

**Technická univerzita v Liberci**

**Fakulta strojní**

**Katedra energetických zařízení**



**Diplomová práce**

**Numerická simulace toku oleje v mezeře  
ozubených kol**

**(Numerical simulation of oil flows in tooth space of geared  
transmission)**

Stanislav Jirouš

Liberec 2008



**TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V LIBERCI**

**Fakulta strojní**



---

**Katedra energetických zařízení**

Studijní program: magisterský – M2301 strojní inženýrství

Obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika

Zaměření: Mechanika tekutin a termodynamika

**Stanislav Jirouš**

**Numerická simulace toku oleje v mezeře ozubených kol**

**(Numerical simulation of oil flows in tooth space of geared transmission)**

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Karel Fraňa, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Doc. Ing. Jiří Unger, Csc., Ing. František Lemfeld

Rozsah práce

Počet stran: 74

Počet obrázků: 85

Počet tabulek: 15

Počet grafů: 0

Počet příloh: 16

V Liberci 23. května 2008

## **TÉMA: Numerická simulace toku oleje v mezeře ozubených kol**

**ANOTACE:** (Stručný výtah náplně, způsob řešení výsledků)

Tato diplomová práce obsahuje studii vzniku lokálního minima tlaku na povrchu ozubeného kola s ohledem na parametry řešení a vliv těchto minim na destrukci povrchu materiálu. Při vzniku lokálních minim tlaku je sledován vliv viskozity oleje, velikosti přenášeného kroutícího momentu a velikost otáček soukolí. V diplomové práci je zohledněn vliv různé geometrie zubu na tvorbu lokálních minim tlaku a ukázán směr možnosti potlačení nežádoucího poškození povrchu zubu.

## **THEME: Numerical simulation of the oil flow in the tooth wheel gap**

**ANNOTATION:** (Short summary of content, used methods)

This work contains an analysis of the existence of the local pressure minimum on the tooth wheel surface. The effect of the pressure minima on the damage of the wheel surface was investigated numerically and the study of solution parameters on the numerical results was presented. The impact of the viscosity, the torque moment and the size of gear speed was on the origin of local minima of pressure was considered. Moreover, the influence of different tooth geometry upon formation of the local minima of pressure is taken into account in order to show the possible solution of the unwanted tooth surface damage.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** ozubené kolo, numerická simulace, vícefázové proudění, pitting, Fluent

**KEY WORDS:** tooth wheel , numerical simulation, multiphase flows, pitting, Fluent

## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřeby TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do její skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 23. května 2008

Podpis: .....

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my theses to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

In Liberec 23th May 2008

Signature: .....

## **Poděkování:**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce, panu Doc. Ing. Karlu Fraňovi, PhD., za podporu, motivaci, odborné vedení, cenné připomínky, čas a trpělivost, a také panu Doc. Ing. Jířímu Ungerovi, Csc. za podporu při řešení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Wikov MGI a.s. za poskytnutou možnost tvorby diplomové práce.

Obsah .....	- 7 -
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	- 9 -
<b>1. Úvod</b> .....	- 11 -
<b>2. Úvod do problematiky</b> .....	- 13 -
2.1 Ozubené převody .....	- 13 -
2.2 Vznik tepla .....	- 14 -
2.3 Zpěnění oleje .....	- 14 -
2.4 Možné příčiny poškození ozubených kol .....	- 14 -
2.5 Numerická simulace.....	- 15 -
<b>3. Postup řešení</b> .....	- 16 -
<b>3.1 Tvorba základního modelu</b> .....	- 16 -
<b>3.1.1 První geometrický model</b> .....	- 17 -
3.1.1.1 Síť modelu .....	- 18 -
<b>3.1.2 Druhý geometrický model</b> .....	- 19 -
3.1.2.1 Síť modelu .....	- 20 -
<b>3.1.3 Třetí geometrický model</b> .....	- 21 -
3.1.3.1 Síť modelu .....	- 21 -
<b>3.2 Provozní podmínky</b> .....	- 21 -
3.2.1 Parametry oleje .....	- 22 -
3.2.2 Otáčky pastorku .....	- 23 -
<b>3.3 Numerické modely</b> .....	- 24 -
<b>3.3.1 První numerický model</b> .....	- 24 -
3.3.1.1 Počet fází .....	- 24 -
3.3.1.2 Pohyb pastorku .....	- 24 -
3.3.1.3 Matematický model .....	- 25 -
3.3.1.4 Materiálové vlastnosti .....	- 25 -
3.3.1.5 Okrajové podmínky .....	- 26 -
3.3.1.6 Sledování dějů v zubové mezeře .....	- 26 -
3.3.1.7 Nastavení programu Fluent .....	- 26 -

<b>3.3.2 Druhý numerický model .....</b>	<b>- 30 -</b>
3.3.2.1 Počet fází .....	- 30 -
3.3.2.2 Pohyb pastorku .....	- 30 -
3.3.2.3 Matematický model .....	- 31 -
3.3.2.4 Materiálové vlastnosti .....	- 31 -
3.3.2.5 Okrajové podmínky .....	- 31 -
3.3.2.6 Sledování dějů v zubové mezeře .....	- 31 -
3.3.2.7 Nastavení programu Fluent .....	- 31 -
<b>3.3.3 Třetí numerický model .....</b>	<b>- 33 -</b>
3.3.3.1 Počet fází .....	- 33 -
3.3.3.2 Pohyb pastorku .....	- 33 -
3.3.3.3 Matematický model .....	- 34 -
3.3.3.4 Materiálové vlastnosti .....	- 34 -
3.3.3.5 Okrajové podmínky .....	- 34 -
3.3.3.6 Sledování dějů v zubové mezeře .....	- 35 -
3.3.3.7 Nastavení programu Fluent .....	- 35 -
<b>3.3.4 Čtvrtý numerický model .....</b>	<b>- 37 -</b>
3.3.4.1 Nastavení automatického zapisování hodnot .....	- 37 -
<b>3.4 Metody vyhodnocení výsledků .....</b>	<b>- 38 -</b>
3.4.1 Vyhodnocení prvního a druhého numerického modelu .....	- 38 -
3.4.2 Vyhodnocení třetího numerického modelu .....	- 39 -
3.4.3 Vyhodnocení čtvrtého numerického modelu .....	- 40 -
<b>3.5 Tvorba UDF .....</b>	<b>- 41 -</b>
<b>4. Výsledky numerických simulací .....</b>	<b>- 43 -</b>
<b>4.1 Vyhodnocení prvního numerického modelu .....</b>	<b>- 43 -</b>
<b>4.2 Vyhodnocení druhého numerického modelu .....</b>	<b>- 47 -</b>
<b>4.3 Vyhodnocení třetího numerického modelu .....</b>	<b>- 52 -</b>

4.3.1	Ověření výskytu lokálních minim tlaku .....	- 52 -
4.3.2	Výskyt tlakových minim pro různé hodnoty dynamické viskozity .....	- 54 -
4.3.3	Výskyt tlakových minim pro různé velikosti sítě a časový krok .....	- 55 -
<b>4.4</b>	<b>Vyhodnocení čtvrtého numerického modelu .....</b>	<b>- 57 -</b>
4.4.1	Vliv viskozity na tlaková minima v zubové mezeře .....	- 57 -
a)	četnost minim tlaků v závislosti na poloze výskytu .....	- 58 -
b)	četnost minim tlaků v závislosti na velikosti podtlaků .....	- 60 -
4.4.2	Četnosti lokálního podtlaku v závislosti na šířce zubové mezery .....	- 62 -
4.4.3	Četnosti lokálního podtlaku v závislosti na velikosti otáček pastorku .....	- 64 -
a)	četnost minim tlaků v závislosti na poloze výskytu .....	- 65 -
b)	četnost minim tlaků v závislosti na velikosti podtlaků .....	- 66 -
c)	četnost minim tlaků v 1. a 2. oblasti geometrie pro jednotlivé tlakové rozmezí ..	- 67 -
4.4.4	Četnosti lokálního podtlaku v závislosti na typu geometrie .....	- 69 -
a)	četnost minim tlaků v závislosti na poloze výskytu .....	- 70 -
b)	četnost minim tlaků v závislosti na velikosti podtlaků .....	- 70 -
<b>5.</b>	<b>Zhodnocení dosažených výsledků práce .....</b>	<b>- 72 -</b>



## Seznam použitých značek a zkratek

$m$	mm	- modul
$Z_i$	-	- počet zubů i-tého kola
$n$	1/min.	- počet otáček ozubeného kola
$\omega$	rad/s	- úhlová rychlost
$x_i$	mm	- i-tá souřadnice na ose x
$y_i$	mm	- i-tá souřadnice na ose y
$D_b$	mm	- průměr základní kružnice
$a$	mm	- poloměr základní kružnice
$k$	-	- parametr
$T$	-	- konečná hodnota parametru $t$
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	- hustota
$\nu$	mm <sup>2</sup> /s	- kinematická viskozita
$\mu$	Pa.s	- dynamická viskozita
$t$	s	- čas

## Úvod

Tato práce vznikla na základě potřeby vysvětlení poškození ozubených kol při provozu. Úkolem této práce je vyšetřit chování oleje v zubové mezeře při záběru ozubených kol, zjistit především povahu proudění oleje, tlaková pole v oleji a tím vysvětlit možné poškození ozubených kol. Budou porovnány dosažené výsledky s reálným provozem ozubených kol a hledány možnosti zamezení vzniku porušení ozubených převodů.

Ozubené převody přenášejí energii pomocí tvarové vazby. Na zubech ozubených kol je olejový film, který zde vzniká v důsledku brodní alespoň jednoho ozubeného kola v olejové lázni převodové skříně z důvodu mazání a chlazení ozubených převodů. Při dosedání ozubených kol na sebe se předpokládá, že je výkon nejdříve přenášen tenkou olejovou vrstvou na zub ozubeného kola a po dotyku zubu pastorku na zub spoluzabírajícího ozubeného kola je dále přenášen tvarovou vazbou. Tyto dva děje nelze od sebe oddělit, protože bude vždy nějaké množství oleje v zubové mezeře a oba děje budou probíhat zároveň.

Ozubené převody vytvářejí tvarovou vazbu mezi hnaným a hnacím členem a umožňují tak přenášet a transformovat energii, vstupující a vystupující parametry, jako je krouticí moment a otáčky. Transformace energie není beze ztrát a část vstupující energie je přeměněna v teplo. Při přenášení vysokých výkonů může tato energie být značná a teplo vzniklé v převodové skříně pak výrazně ovlivnit provozní podmínky ozubených převodů. Tento ztrátový výkon se v první řadě projeví na vlastnostech oleje, který má funkci mazání a chlazení ozubených převodů. Při provozu roste teplota oleje a s ní se mění i jeho viskozita, která je důležitá pro děje v oleji.

Určit procesy v zubové mezeře, které se dějí při záběru ozubených kol, je velice těžké z několika hledisek. Kinematika ozubených kol je složitá a reálný pohyb bude ovlivněn výrobní přesností a opotřebením ozubených kol. Děje v zubové mezeře budou dále ovlivněny přenášeným a ztrátovým výkonem, který může způsobovat zahřívání oleje a tak měnit jeho vlastnosti. Mezi další parametry ovlivňující chování ozubených převodů patří rotační rychlost a geometrie jednotlivých zubů.

Ke studiu proudění oleje v zubové mezeře byly použity numerické simulace, které byly provedeny v komerčním programu Fluent. Budou vyšetřovány různé provozní podmínky a

parametry provozu ozubeného soukolí. Jevy v zubové mezeře ovlivňuje celá řada parametrů, proto byly vybrány pouze některé z důvodu rozsáhlosti a komplexnosti problému.

Kvůli složitosti problému bylo postupováno od zjednodušených modelů ke složitějším. Byly tak získávány výsledky, které se staly podkladem pro další práci a určovaly vývoj studie chování oleje v zubové mezeře při záběru ozubených kol. Problematika dějů chování oleje v zubové mezeře je zcela nová a bylo třeba určit postupy zkoumání a zjistit samotné možnosti této práce.

V první fázi práce byly uvažovány pouze části evolvent zubů ozubených kol a jednofázový model. Pohyb částí zubů byl reprezentován pouze přímočarým pohybem. Tento model ukázal jakým způsobem modelovat pohyb částí geometrie a hrubou představu chování oleje v zubové mezeře.

V další fázi výzkumu byl použit dvou-fázový model. Byla získaná představa o mazání zubů ozubených kol a byly objeveny tlakové extrémy, na které se práce dále zaměřila. Zároveň byly objeveny nedostatky a příčiny nepřesností numerické simulace.

Dalším postupem v práci bylo použití nového geometrického modelu, tím došlo k odstranění nedostatků předcházejících modelů. Numerický model byl vylepšen o odstranění nevyhovujících okrajových podmínek a byl použit rotační pohyb pro pohyb pastorku. Tento model se ukázal jako nejlepší z dosavadních použitých a poskytl značný prostor pro studii dějů v zubové mezeře ozubených převodů.

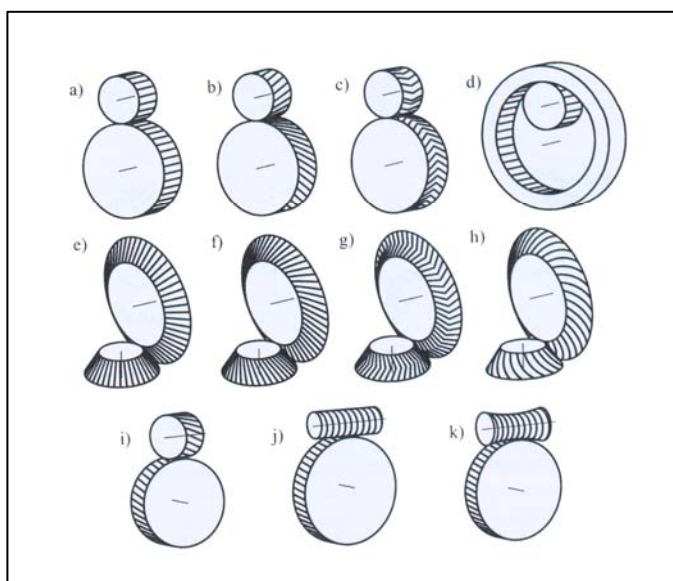
V diplomové práci se spolupracovalo se společností Wikov MGI a.s. , která potřebovala vyřešit problém poškozování povrchu zubu ozubeného soukolí. Konkrétní parametry a návrhy byly společně konzultovány a výsledky konfrontovány se zkušenostmi ze společnosti.

## 2. Úvod do problematiky

### 2.1 Ozubené převody

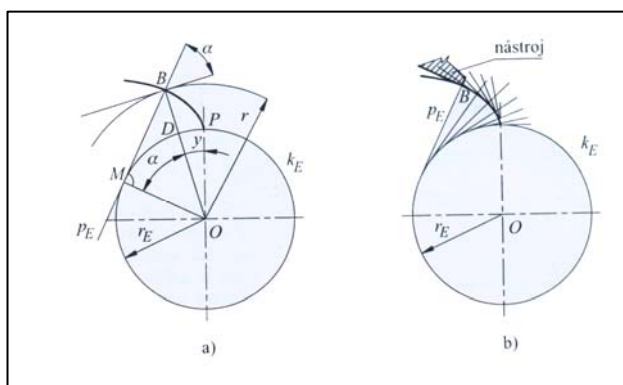
Funkce ozubených převodů je přenášet výkon prostřednictvím tvarové vazby. Mezi základní typy ozubených převodů (*obr.2.1*) patří čelní, kuželová, šroubová a šneková soukolí. Dále je možno rozlišovat soukolí dle typu zubů. Jsou to přímé, šikmé, šípové a zakřivené zuby.

*Obr.2.1 – typy ozubených soukolí [5]*

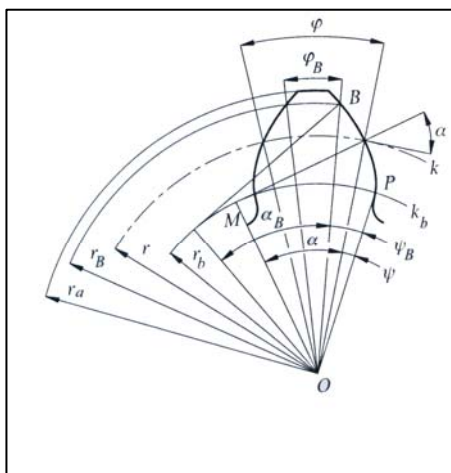


Konstrukční možnosti ozubených převodů jsou téměř neomezené. Je používána celá řada součinitelů ovlivňující základní parametry ozubených soukolí. Ve většině případů je používán evolventní profil boku zubu (*obr.2.2*). Lze použít i části epicykloidy a hypocykloidy ke tvorbě profilu boku zubu. Pro uvažované případy byla použita evolventa jako tvořící křivka profilu boku zubu.

*Obr.2.2 – evolventní profil boku zubu [5]*



*Obr.2.3 – geometrie ozubeného kola[5]*



Při záběru ozubených kol se zuby dotýkají ve valivém bodě a jsou po sobě odvalovány po záběrové úsečce, tím dochází k přenosu energie. Vzniká zde energie ve formě tepla vlivem tření zubů, které je způsobeno nepřesnostmi výroby, montáže, opotřebením ozubení, vibracemi a průhybem hřídele. Olej vyplňující zubovou mezeru se vlivem ztrátové energie zahřívá a mění své fyzikální vlastnosti. S rostoucí teplotou klesá dynamická viskozita oleje a tímto procesem se snižuje mazací schopnost oleje. Vliv různé provozní teploty oleje bude simulován změnou dynamické viskozity oleje.

Prostor zubové mezery není vyplněn pouze olejem, ale směsí oleje a vzduchu. Při záběru ozubených kol se mění obsah vzduchu v oleji a dochází k jeho zpěnění. Byl zvolen dvoufázový model „olej-vzduch“, který tyto jevy postihne.

Tenký olejový film je v zubové mezeře extrémně zatížen a vytlačován ven ze zubové mezery. Vazkost oleje a tečné smykové napětí „brání“ vytékání oleje ze zubové mezery. Pohybem

k sobě ozubených kol roste napětí v olejovém filmu. Na základě těchto jevů vzniká složité tlakové pole v zubové mezeře.

V tlakovém poli sledovaném v zubové mezeře se objevují lokální extrémy tlaku, které se objevují pouze v určitém místě geometrie s různou četností. Výskyt tlakových extrémů se opakuje několikrát během jednoho záběru ozubených kol. Předpokládá se, že negativní vliv mají především extrémní podtlaky, které působí tahem na geometrii zubu a tím mohou vytrhávat malé částčky ozubeného kola. Při provozu ozubeného soukolí po dobu 12 hodin jsou četnosti vysokých tlaků v řádech milionů. Pravidelné opakování extrémních podtlaků je považováno za příčinu poškození ozubeného soukolí.

## **2.5 Numerická simulace**

Numerická simulace umožňuje sledovat děje, které probíhají v zubové mezeře. Je to jediný možný způsob, jak sledovat procesy v celé olejové vrstvě. Numerická simulace nám dává komplexní informaci o tlakovém a rychlostním poli a o fázovém rozdělení v oleji. Tyto veličiny lze sledovat v čase a zkoumat tak nestacionární jevy, které při záběru ozubených kol vznikají.

Pomocí simulace lze sledovat nestacionární tlaková a rychlostní pole i rozložení oleje a vzduchu při různých provozních podmínkách a různých tvarech ozubeného soukolí. Změnou provozních parametrů je možno stanovit optimální podmínky provozu soukolí, při kterém bude docházet k co nejmenšímu opotřebení soukolí. Numerická simulace umožňuje vyšetřovat změny provozních podmínek ozubených kol v relativně krátkém čase.

Experimenty ukazují poškození ozubených kol v závislosti na otáčkách, zatížení, délce provozu, typu geometrie, ale nedávají nám informaci o vzniku a příčině poškození ozubeného soukolí. Numerické simulace a jejich závěry jsou porovnávány s experimenty pro ověření vypovídající hodnoty simulace.

### 3. Postup řešení

V komerčním programu Fluent byl zvolen matematický model, který nejlépe popisuje danou problematiku. Nejdříve byly testovány dynamické vlastnosti výpočetní sítě a byla provedena optimalizace výpočetní sítě pro zjednodušený geometrický model, později pro složitější model. Všechny modely byly uvažovány izotermní. Jako první byl použit jednofázový model (olej) a později dvoufázový model (olej- vzduch).

Po provedených výpočtech na značně zjednodušených geometrických model byly použity složitější geometrické modely, které lépe odpovídaly skutečné geometrii ozubeného soukolí a byly uplatněny poznatky, které přinesly první provedené simulace.

#### 3.1 Tvorba základního modelu

Použité ozubené převody byly typu čelní se šikmými zuby. Geometrický model byl vytvořen z parametrů dodaných firmou Wikov MGI a.s. Byly vypočítány potřebné rozměry k definování všech částí ozubených kol. Všechny geometrické modely vycházely z těchto údajů. Dle potřeby modelu byly použity jen části zubů ozubených převodů, či celé zuby.

Dle údajů z výkresů byly dopočítány základní parametry, které se staly podkladem pro tvorbu geometrické sítě modelu v programu Gambit a tvorbu parametrického modelu v programu Pro Engineer Wildfire 2 a následné vytvoření sítě.

Dáno:  $z_1 = 16$  ;  $z_2 = 50$ ;  $m = 6$  mm

### 3.1.1 První geometrický model

Model částí ozubených kol byl vytvořen v programu Gambit (*Obr.3.1*). Pro tvorbu profilu zubu byla použita parametrická rovnice evolventy a upravena pro jednotlivé ozubená kola.

Parametrická rovnice evolventy :

$$x_i = a \cdot [\cos(k) + k \cdot \sin(k)]$$

$$y_i = a \cdot [\sin(k) - k \cdot \cos(k)]$$

$$a = \frac{D_b}{2} = \frac{1}{2} m_t \cdot z \cdot \cos(\alpha)$$

- a = poloměr základní kružnice

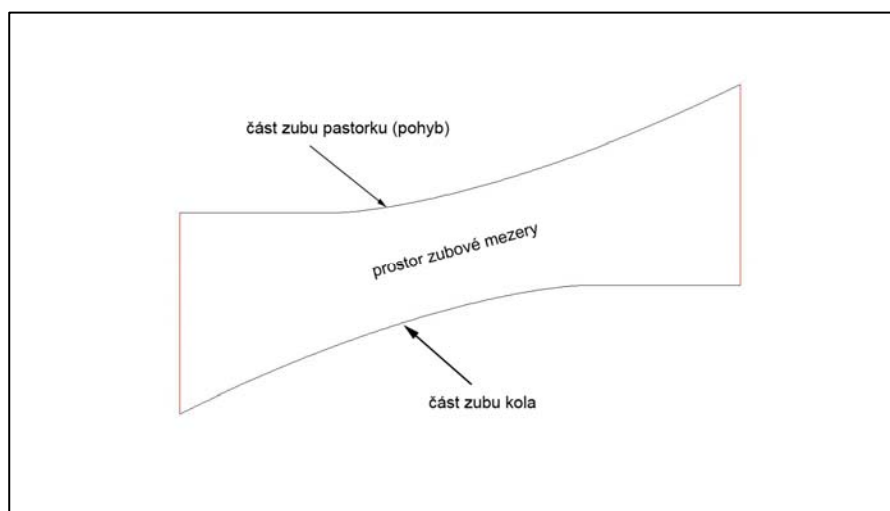
$$T = \sqrt{\frac{D_a}{a^2} - 1}$$

- T = konečná hodnota parametru v parametrických rovnicích

V parametrických rovnicích se vyskytuje parametr „k“. Pokud pro tento parametr bude platit  $k \in \langle 0, T \rangle$  , tak body z parametrických rovnic budou odpovídat části evolventy mezi základní a hlavovou kružnicí.

Tímto způsobem byly vygenerovány body a načteny do programu Gambit. Dalšími úpravami vznikla zjednodušená geometrie reprezentující části ozubených kol.

*Obr.3.1 - zjednodušená geometrie zubu*



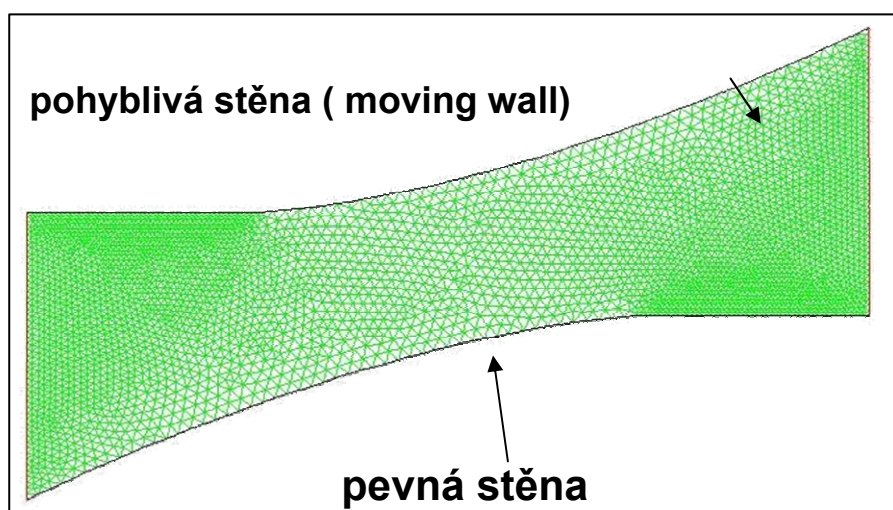


Modelu byly přiděleny odpovídající okrajové podmínky. Pro části zubů byla použita okrajová podmínka typu – *wall* a pro ohraničení zubové mezery podmínka typu – *outflow*.

### 3.1.1.1 Sít' modelu

V programu Gambit byla vygenerovaná automatická sít' z trojúhelníkových elementů (Obr.3.2). Testovaly se různé hustoty sítě. Rozhodujícím kritériem pro sít' byla nutnost zajištění dostatečného počtu elementů při těsném přiblížení zubů k sobě. Dále se testoval vliv hustoty sítě na děje sledované v zubové mezeře.

Obr.3.2 - sít' zjednodušeného modelu



Obrázek 3.2 je pouze ilustrační. Ve skutečném modelu byla použita sít', která má všechny elementy stejně velké, hustota sítě je tak v celé oblasti zubové mezery stejná. Celkový počet elementů je 56,276. Pro tvorbu sítě byly použity trojúhelníkové elementy, které vytvořily přibližně homogenní nestrukturovanou sít'.

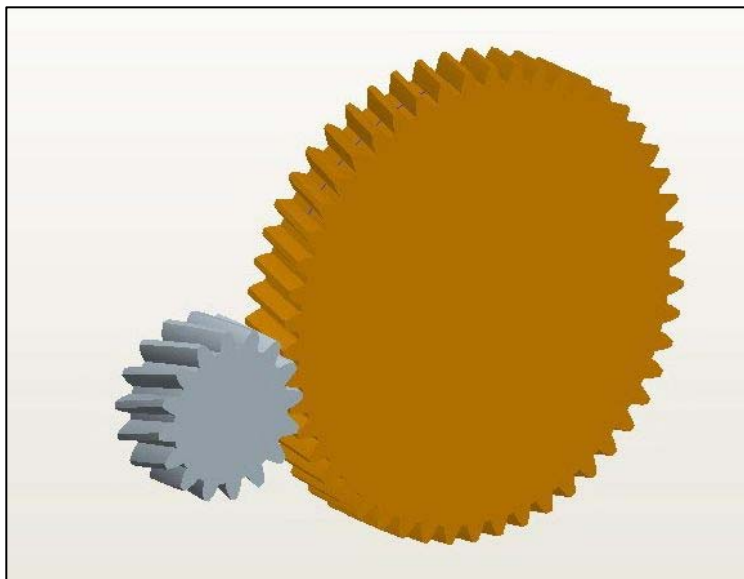
Při výpočtu se horní stěna pohybuje přímočarým pohybem směrem dolů, tím se zmenšuje šířka zubové mezery. Při tomto ději se mění kvalita sítě, především v blízkosti pohybující se stěny. Učinily se opatření a nastavení tak, aby kvalita sítě zůstala zhruba zachována, více v popisu nastavení programu Fluent.

Horní stěna se pohybuje rychlostí  $v = 0,8042 \text{ m/s}$ . Zubová mezera je v nejužším místě 4,732 mm široká a při přímočarém pohybu je doba přibližování 0,005841s.

### 3.1.2 Druhý geometrický model

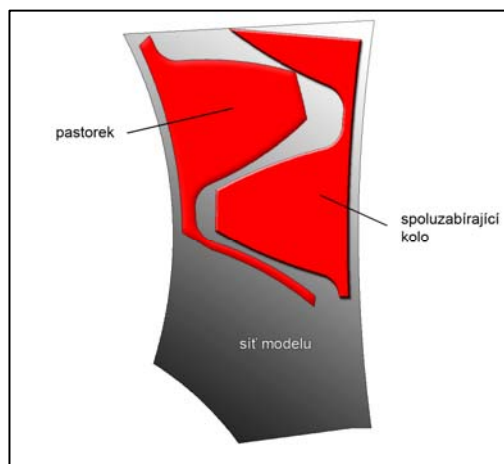
Druhý geometrický model je složitější a lépe vystihuje geometrii ozubených převodů. Na základě parametrů bylo vymodelováno ozubené soukolí v programu Pro Engineer Wildfire 2 (Obr.3.3).

*Obr.3.3 – 3d model ozubeného soukolí*



Tento model byl importován do programu Gambit a dále upraven. Z původního soukolí se použila geometrie dvou zubů a 3D model byl zredukován pouze na 2D model. Tyto dva zuby jsou v poloze těsně před záběrem. Na částech ozubených kol bylo nutné doplnit zaoblení u patních kružnic a bylo třeba vytvořit obsah, který by reprezentoval objem převodové skříně a zubovou mezeru. Z hlediska náročnosti výpočtu byla zvolena geometrie tak, aby měla malou velikost a umožňovala pohyb částí ozubených kol (Obr.3.4).

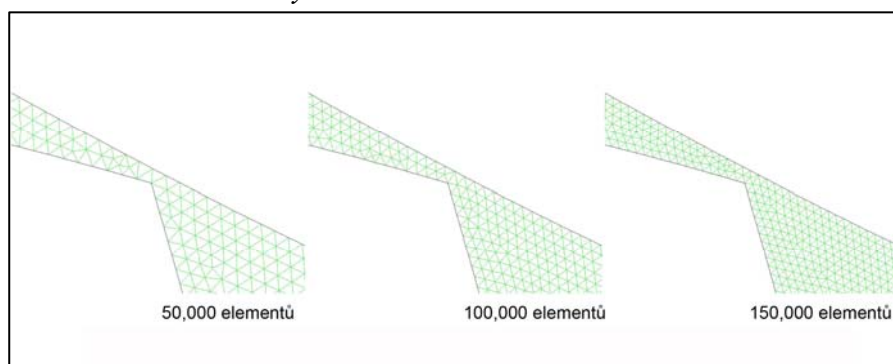
*Obr.3.4 - 2D model částí zubů  
- výsledná geometrie pro  
program Fluent*



### 3.1.2.1 Sít' modelu

Sít' byla opět automaticky vygenerovaná v programu Gambit, tvoří ji trojúhelníkové elementy. Byla použita přibližně homogenní nestrukturovaná sít' v uvažované oblasti modelu. Celkem se testovaly tři hustoty sítě (Obr.3.5) s počtem elementů 150 000; 100 000 a 50 000 ke sledování dějů v zubové mezeře. Pro různé hustoty sítě se měnilo i rozlišení sítě na hraně ozubeného kola. Ukázalo se, že lze používat sít', která má 50 000 elementů. Sít' s tímto počtem elementů se ukázala jako ideální vzhledem k době výpočtu a její přesnosti.

Obr.3.5 - různé hustoty sítě



Pro tento geometrický model byly použity okrajové podmínky pouze typu – *wall* a *fluid*, což se ukázalo jako výhodné, protože nebylo ovlivněno proudění v oblasti zubové mezery. Při používání okrajové podmínky typu – *outflow* docházelo k ovlivnění proudění právě v blízkosti této okrajové podmínky.

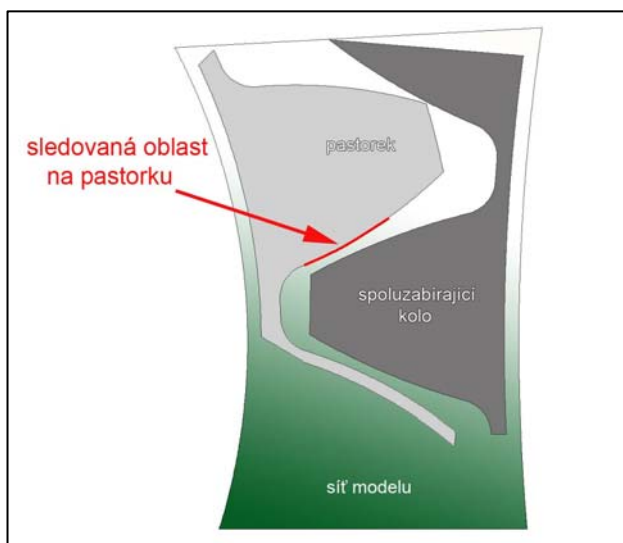
**prvky sítě** : trojúhelníkové elementy, **velikost sítě** : 50 000 ; 100 000 ; 150 000 uzlových bodů

### 3.1.3 Třetí geometrický model

Tento poslední geometrický model je téměř totožný s druhým geometrickým modelem. Byla však zmenšena velikost výpočetní sítě, což přispělo ke kratší výpočetní době. Geometrie zubů zůstala stejná, došlo však ke změně členění zubu pastorku.

Zub pastorku byl rozdělen na 2 oblasti (Obr.3.6). V závěrečná fázi této práce bylo třeba sledovat tlakové pole přímo na geometrie zubu a to v oblastech, kde dochází k největšímu porušení povrchu zubu ozubeného kola.

Obr.3.6 - třetí geometrický model



#### 3.1.3.1 Síť modelu

Na obrázku 3.6 je červeně vyznačená oblast, pro kterou je možno vypisovat údaje při průběhu řešení. Tato oblast obsahuje 46 bodů při celkovém počtu elementů 36 000. Tato síť je stejně kvalitní jako u předcházejícího modelu. Snížení počtu elementů bylo dosaženo změnou velikosti výpočetní oblasti.

**prvky sítě** : trojúhelníkové elementy, **velikost sítě** : 36 000 uzlových bodů

Okrajové podmínky jsou typu – *wall* pro stěny a typu – *fluid* pro uvažovaný objem převodové skříně.

### 3.2 Provozní podmínky

Ozubené soukolí je provozováno při otáčkách pastorku  $n = 1500$  ot./min. Teplota oleje je reprezentována hodnotou viskozity. Numerický model se řešil bez energetických rovnicí a tak teplotu oleje nebude možno sledovat. Různé provozní teploty, které vznikají v důsledku

zahřívání, budou simulovány změnou viskozity. Změna teploty nastává při uvedení soukolí do provozu z klidu při klidové teplotě. Teplota oleje se pohybuje v rozmezí dvou hodnot, které představují klidovou teplotu a teplotu při ustáleném teplotním stavu. V tomto rovnovážném stavu se rovná teplo produkované ztrátami ozubeného soukolí teplu odváděnému z převodové skříně prostřednictvím oleje a samotné převodové skříně.

### 3.2.1 Parametry oleje

Pro mazání ozubených převodů se v tomto případě používá průmyslový převodový olej MOGUL INTRANS 220.

Je to vysoce kvalitní ropný průmyslový převodový olej. Hluboce rafinovaný základový olej, na jehož základě byl tento olej převážně formulován, je vyroben speciální hydrogenační technologií. Obsahuje účinné přísady pro zvýšení oxidační stálosti, k zlepšení vysokotlakové vlastnosti, ochranných vlastností proti rezivění.

#### **Charakteristické vlastnosti:**

- výborně chrání mazané převody, příp. jiné soustavy proti opotřebení – má vynikající vysokotlakové vlastnosti
- velmi dobře chrání proti korozi (ocel i barevné kovy)
- zaručuje ochranu železných materiálů proti rezivění
- výborná odolnost proti oxidaci je zárukou dlouhé životnosti
- velmi dobré deemulgační vlastnosti dovolují použití i v případech, kdy do systému proniká v omezené míře voda
- příznivá viskozitně teplotní závislost

#### **Vlastnosti oleje :**

Hustota (při 15 °C):  $\rho = 893 \text{ kg/m}^3$

Rozmezí bodu varu: nestanoveno

Bod vzplanutí OK: nad 230 °C

Bod hoření: nad 250 °C

Koncentrační meze výbušnosti: za běžných podmínek netvoří výbušné páry

Rozpustnost ve vodě: nerozpustný

Kinematická viskozita při 40 °C:  $\nu = 198 \text{ až } 242 \text{ mm}^2/\text{s}$

Rozdělovací koeficient n-oktanol/voda: nestanoveno

Kinematická viskozita je uvedena v rozsahu hodnot 198-242 mm<sup>2</sup>/s. V numerických simulacích bylo použito hodnot  $\mu$  - dynamické viskozity dle tabulky (tab.č.1) Tyto hodnoty dynamické viskozity představují závislost oleje na teplotě.

Tabulka č.1

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

<b>dynamická viskozita</b>
0,05 [Pa.s]
0,1 [Pa.s]
0,15 [Pa.s]
0,2 [Pa.s]

### 3.2.2 Otáčky pastorku

Otáčky ozubeného soukolí jsou  $n = 1500$  ot./min. V prvním geometrickém modelu je značné zjednodušení v použití přímočaré rychlosti místo úhlové rychlosti. Přímocará rychlost byla spočítána ze znalosti otáček pastorku a průměru roztečné kružnice. Zjednodušení také spočívá v uvažování pouze pohybu pastorku.

Ve druhém a třetím geometrickém modelu je již k definování pohybu pastorky použita úhlová rychlost, která je vypočítána z otáček pastorku.

V této práci bude také zkoumán vliv otáček na proudění a děje v zubové mezeře. Hodnoty otáček použitých v numerických simulacích jsou zobrazeny v tabulce č.2 .

Tabulka č.2

<b>otáčky pastorku</b>
1900[ot/min]
1700[ot/min]
1500[ot/min]
1300[ot/min]

### 3.3. Numerické modely

Byly použity celkem čtyři numerické modely, které se postupně zdokonalovaly a odpovídaly požadavkům pro sledování chování oleje v zubové mezeře. Hlavní rozdíly v numerických modelech byly v nastavení počtu fází modelu, nastavení okrajových podmínek a také v nastavení přímočaré nebo rotační úhlové rychlosti.

Při změně parametru otáček a viskozity u testů různých provozních podmínek se tyto změny nepovažovali za nový numerický model

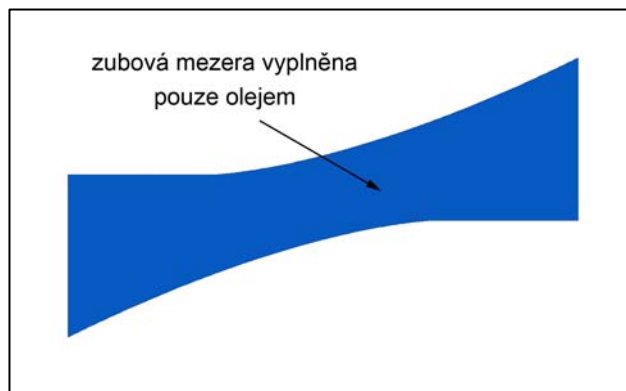
#### 3.3.1 První numerický model

Numerický model vychází z prvního geometrického modelu (*viz 3.1.1*).

##### 3.3.1.1 Počet fází

Tento numerický model je jednofázový model. V celém prostoru zubové mezery uvažujeme pouze olej (*obr.3.7*). Tato skutečnost nám neumožňuje sledovat zpěnění oleje a ředění vzduchem. V prostoru zubové mezery bude sledováno tlakové a rychlostní pole oleje. Pro prvotní studii chování oleje v zubové mezeře je tento zjednodušený přístup vyhovující.

*Obr.3.7 - olej v zubové mezeře*

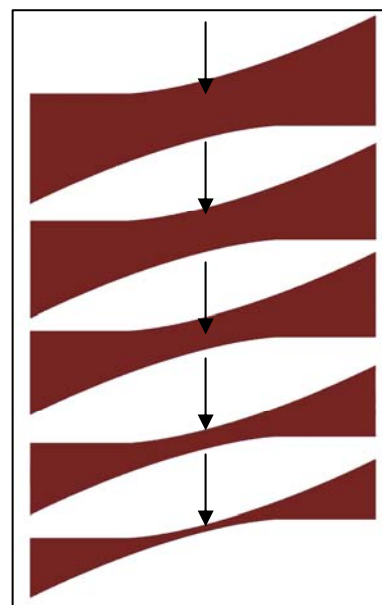


##### 3.3.1.2 Pohyb pastorku

K definování pohybu pastorku se použila pouze přímočará rychlost ve směru osy y. Toto zjednodušení je dostačující, protože na poloměru pastorku pro relativně malé vzdálenosti lze nahradit úhlovou rychlost přímočarou rychlostí.

Obr.3.8 - znázornění pohybu sítě

Na obrázku 3.8 jsou znázorněny sítě modelu v jednotlivých časových okamžicích. Obrázek naznačuje směr pohybu pastorku. Geometrie pastorku reprezentuje horní stěna, která se pohybuje směrem dolů.



### 3.3.1.3 Matematický model

V numerickém modelu nejsou uvažovány gravitační ani jiné externí síly. Pro tento zjednodušený geometrický model nemá význam použít gravitační síly. K dosednutí zubů dojde ve velice krátkém časovém okamžiku a použitím gravitačních sil by se navíc zvýšil výpočetní čas. V modelu nejsou zahrnuty energetické rovnice, tedy se použil izotermní případ. Růst teploty vlivem provozu ozubeného soukolí byl simulován změnou viskozity.

### 3.3.1.4 Materiálové vlastnosti

Materiálové vlastnosti byly převzaty od výrobce převodového oleje. Pro jednofázový model to byla hodnota dynamické viskozity a hustota oleje. Hodnota dynamické viskozity v prvním numerickém modelu je  $\mu = 0,19646$  [Pa.s] a hustota  $\rho = 893$  [kg/m<sup>3</sup>] (Tab.č.3).

Tabulka č.3

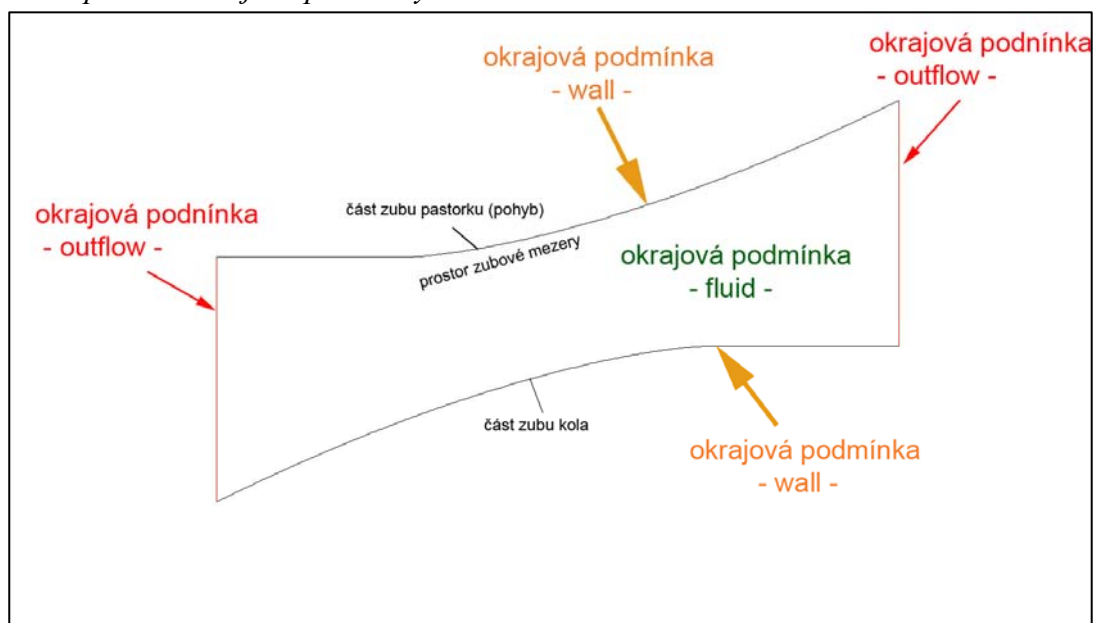
dynamická viskozita	$\mu = 0,19646$ [Pa.s]
hustota	$\rho = 893$ [kg/m <sup>3</sup> ]



### 3.3.1.5 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky byly zvoleny pro pevnou i pohyblivou stěnu typu – *wall*. Pro kraje uvažované zubové mezery, kterými olej vytéká pryč, byly zvoleny okrajové podmínky typu – *outflow*. Pro prostor zubové mezery, který je vyplněn olejem, je zvolena okrajová podmínky typu – *fluid*. Všechny okrajové podmínky (Obr.3.9) byly nastaveny v programu Gambit a do programu Fluent byly automaticky převedeny.

Obr.3.9– použité okrajové podmínky



### 3.3.1.6 Sledování dějů zubové mezeře

Pro sledování tlakových a rychlostních polí bylo nastaveno ukládání obrazu těchto polí pro každý časový okamžik. Dále se vytvořilo 11 bodů podél geometrie boku zubu, ve kterých se v 10-ti intervalech během přibližování zubů k sobě zaznamenaly hodnoty tlaků. Tímto způsobem byla získána představa o velikosti tlaků v jednotlivých stupních přibližování.

### 3.3.1.7 Nastavení programu Fluent

#### 1. Načtení vytvořené geometrie z programu Gambit včetně nadefinovaných okrajových podmínek

*File → Read → Case*

Načtení vytvořeného modelu se sítí (koncovka \*.msh)

## 2. Nastavení řešiče

*Define → Model → Solver*

Nastavení nestacionárního modelu a určení způsobu řešení rovnic.

## 3. Nastavení modelu turbulence

*Define → Model → Viscous*

**4. Nastavení vícefázové modelu nebylo provedeno, protože uvažujeme pouze jednofázový model.**

## 5. Definice parametrů oleje

*Define → Materials*

Pro olej byly zadány odpovídající hodnoty

$$\mu = 0,19646 \text{ [Pa.s]}$$

$$\rho = 893 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

## 6. Okrajové podmínky

*Define → Boundary Condition*

Horní a spodní profil evolventy je typu – *wall* , stěny ohraničující zubovou mezeru jsou typu – *outflow* , prostor zubové mezery je typu – *fluid*.

## 7. Vytvoření a načtení „knihovny“ v programu Fluent

*Define → User – Define → Functions → Compiled*

Bylo nutné vytvořit a načíst „knihovnu“ pro program Fluent. Tato „knihovna“ definuje jakou rychlostí se bude stěna pastorku pohybovat.

Soubor pro tvorbu knihovny byl vytvořen v programu Microsoft visual basic .

## 8. Nastavení pohybu pastorku

*Define → Parameters → Dynamic Mesh*

Daným příkazem bylo umožněno použít pohybující se síť. V podmenu tohoto příkazu byly zvoleny hodnoty pro zjemnění sítě a její vyhlazování a tím byla zajištěna zhruba stejná kvalita sítě v průběhu výpočtu.

V dalším kroku nastavení byly určeny části geometrie, které se pohybují a které jsou nehybné. To bylo provedeno pomocí příkazu :

*Define → Dynamic mesh → Zones*

a byly nastaveny další nutné parametry pro definici pohybu jednotlivých částí geometrie.

## 9. Inicializace řešiče

*Solve → Initialize → Initialize*

Nastavení počátečních podmínek řešení. V tomto případě to je nastavení nulových rychlostí a tlaků pro všechny elementy sítě.

## 10. Sledování reziduí

*Solve → Monitors → Residua*

Všechna rezidua jsou nastavena na hodnotu 1e-5

## 12. Nastavení animací

Díky animacím můžeme sledovat nestacionární tlakové i rychlostní pole v zubové mezeře. Můžeme nastavit, zda chceme sledovat například každý časový krok, nebo každý druhý. Toto sledování je výhodné pro pozorování vývoje rychlosti v zubové mezeře nebo průběh rozložení fáze ve vícefázovém modelu. V daném modelu sledujeme tlakové a rychlostní pole v každém okamžiku.

*Solve → Animate → Define*

### 13. Tvorba bodů pro vyhodnocování

Pro tvorbu vyhodnocovacích bodů byla použita funkce v programu Fluent a označilo se 11 bodů, ve kterých byly sledovány hodnoty tlaků.

*Surface → Point → [X;Y] → Create*

### 14. Nastavení časového kroku, počet kroků a počet iterací

*Solve → Iterate*

Velikost časového kroku byla zvolena  $dt = 1e-5s$ , z důvodu stability řešení. Při zvolení většího časového kroku řešení divergovalo a bylo nutné použít malý časový krok. Počet iterací na časový krok bylo dvacet.

Počet časových kroků byl dán geometrií a velikostí rychlosti přímočarého pohybu. Jedná se o přibližování dvou zubů k sobě, takže po určité době je zubová mezera v nejtenčím místě široká stejně jako velikost elementu sítě. Při dalším přibližování se zmenšuje velikost elementu až na nulovou velikost. V tomto okamžiku bylo dosaženo konce výpočtu.

### 3.3.2 Druhý numerický model

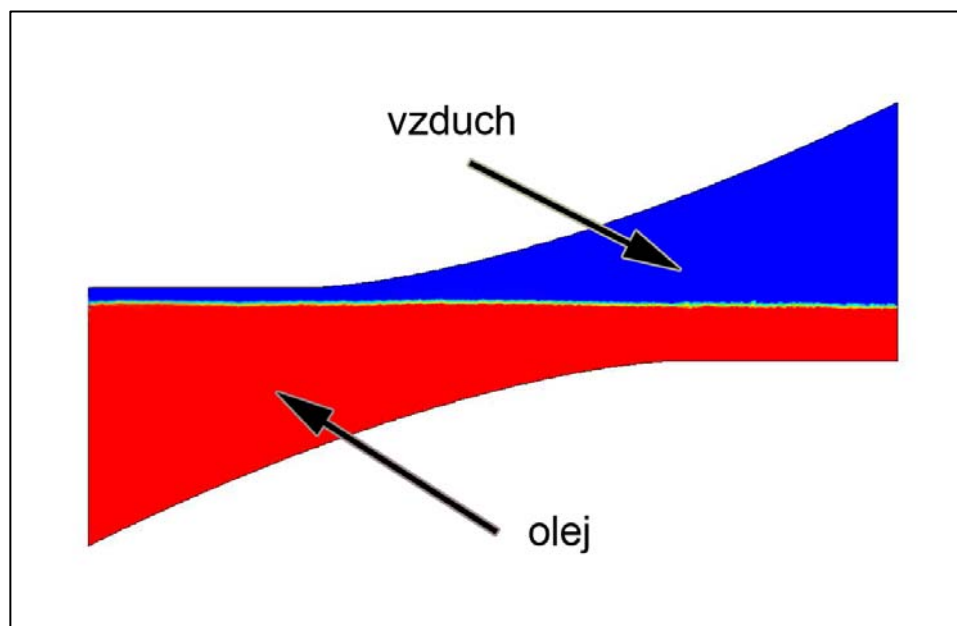
Numerický model vychází z prvního geometrického numerického modelu (viz 3.1.1). Budou zmíněna pouze nastavení, která se liší od prvního numerického modelu.

#### 3.3.2.1 Počet fází

Tento numerický model je dvoufázový (Obr.3.10). Je uvažován objem oleje a objem vzduchu. Toto nastavení nám umožní sledovat rozložení oleje a vzduchu v zubové mezeře. Můžeme pozorovat, jak jsou jednotlivé geometrie zubu mazány olejem a jakým způsobem se pohybují bublinky vzduchu v zubové mezeře.

K modelování objemu vzduchu a oleje bylo použito funkce v programu Fluent a nebylo nutné tvořit samostatný objem pro každou fázi zvlášť.

Obr.3.10 – zobrazení dvoufázového modelu, rozložení oleje a vzduchu v zubové mezeře



#### 3.3.2.2 Pohyb pastorku

Pro druhý numerický model zůstávají nastavení pohybu sítě a okrajové podmínky stejné jako v prvním numerickém modelu (viz 3.3.1).

### 3.3.2.3 Matematický model

Je uvažována fáze oleje a vzduchu, proto byl zvolen model Volume Of Fluid (VOF) [2] pro řešení dvoufázového systému a interpolační schéma Geometric Reconstruction. Energetické rovnice a gravitační síly nebyly uvažovány.

### 3.3.2.4 Materiálové vlastnosti

Vlastnosti oleje zůstávají stejné jako v předcházejícím numerickém modelu. Další materiálové vlastnosti byly převzaty pro fázi vzduchu (Tab.4) z knihovny programu Fluent. Pro vzduch uvažujeme tyto hodnoty  $\mu = 0,17894 \times 10^{-5}$  [Pa.s] a hustotu  $\rho = 1,225$  [kg/m<sup>3</sup>].

Tabulka č.4

vzduch	
dynamická viskozita	$\mu = 0,17894 \times 10^{-5}$ [Pa.s]
hustota	$\rho = 1,225$ [kg/m <sup>3</sup> ]

olej	
dynamická viskozita	$\mu = 0,19646$ [Pa.s]
hustota	$\rho = 893$ [kg/m <sup>3</sup> ]

### 3.3.2.5 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky jsou nastaveny stejně jako v prvním numerickém modelu (viz 3.3.1).

### 3.3.2.6 Sledování dějů v zubové mezeře

V tomto numerickém modelu se zvolil stejný postup jako v předcházejícím modelu. Pro 11 bodů geometrie byly zapisovány hodnoty tlaků.

### 3.3.2.7 Nastavení programu Fluent

Budou zmíněny pouze postupy, které se liší od nastavení programu Fluent v prvním numerickém modelu.

1. Načtení vytvořené geometrie z programu Gambit
2. Nastavení řešiče
3. Nastavení modelu turbulence

### 4. Nastavení vícefázového modelu.

Jak bylo zmíněno v úvodu tohoto modelu, použil se vícefázový model *Volume Of Fluid* (VOF) s interpolačním schématem Geometric Reconstruction.

*Define* → *Model* → *Multiphase*

V menu vícefázového proudění byly nastaveny hodnoty vhodné pro uvažovaný příklad proudění a tím bylo dosaženo dobré stability řešení.

## **5. Nastavení materiálů**

*Define → Materials*

Byly vytvořeny materiály reprezentující vzduch a olej s výše uvedenými vlastnostmi.

6. Okrajové podmínky

7. Vytvoření a načtení knihovny

8. Nastavení pohybu pastorku

9. Nastavení výpočtu

## **10. Tvorba „objemu“**

Protože byl použit vícefázový model a prostor, představující zubovou mezeru, byl tvořen pouze jednou oblastí – surface (2D), bylo nutné tuto oblast rozdělit na dvě oblasti, kterým poté bude nadefinováno, zda se jedná o fázi oleje, nebo vzduchu. K tomuto rozdělení byla použita funkce v programu Fluent.

*Adapt → Region → Region Adaptation*

## **11. Inicializace řešiče**

*Solve → Initialize → Initialize*

Nastavení počátečních podmínek řešení. V tomto případě se jedná o nastavení nulových rychlostí a tlaků pro všechny uzlové body sítě.

*Solve → Initialize → Patch*

Tímto příkazem byla nově vytvořenému objemu přiřazena fáze oleje. Zbývající oblast modelu obsahuje fázi vzduchu.

12. Sledování reziduí 13. Nastavení animací 14. Tvorba bodů pro vyhodnocování 15

Nastavení časového kroku, počet kroků a iterací

### 3.3.3 Třetí numerický model

Třetí numerický model je založen na druhém geometrickém modelu (viz 3.1.2). Tento model lépe vystihuje geometrii ozubeného soukolí a je zde lépe modelována tenká vrstva oleje (Obr.3.11). Dalšího pokroku bylo dosaženo odstraněním okrajových podmínek typu – *outflow*, čím se řešení modelu zpřesnilo.

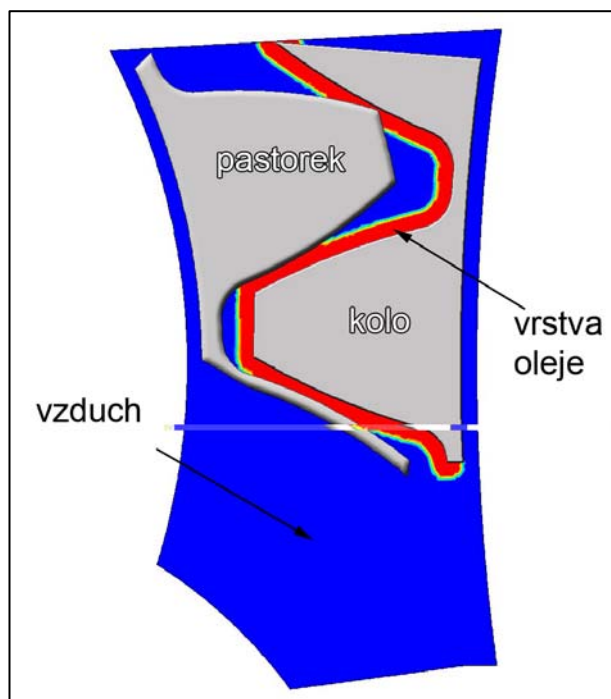
#### 3.3.3.1 Počet fází

Numerický model je dvoufázový model oleje a vzduchu. V tomto případě je modelována tenká vrstva oleje podél geometrie spoluzabírajícího ozubeného kola, tenká 1mm.

Obr.3.11 – zobrazení třetího modelu, rozložení oleje a vzduchu

Modrá barva - 100% vzduch

Červená barva - 100% olej



#### 3.3.3.2 Pohyb pastorku

Pastorek se otáčí rychlostí  $n = 1500$  ot./min. Uvažuje se pouze pohyb pastorku, spoluzabírající ozubené kole je v klidu. Pohyb pastorku probíhá tak dlouho, dokud se ozubená kola nepřiblíží k sobě. V modelu nelze dosáhnout toho, aby obě ozubená kola na sebe dosedla. Přiblíží se k sobě na vzdálenost menší než je velikost elementu sítě. Tato vzdálenost je zanedbatelná.

Výpočet úhlové rychlosti pastorku

$$\omega = \frac{n}{60} \cdot 2\pi = \frac{1500}{60} 2\pi = 157,1 \text{ [rad/s]}$$



Obr.3.12 – znázornění pohybu pastorku



Na obrázku (Obr.3.12) je znázorněno, jak se pastorek pohybuje rotačním pohybem směrem ke spoluzabírajícímu kolu, tím se zmenšuje šířka zubové mezery.

### 3.3.3.3 Matematický model

Opět je uvažován vícefázový model jako v numerickém modelu č. 2. Použití rovnic pro tento model zůstává stejné jako v předcházejících modelech. Nejsou uvažovány gravitační ani jiné síly. Uvažujeme izotermní proudění.

### 3.3.3.4 Materiálové vlastnosti

V daném modelu je nastavena hodnota viskozity  $\mu = 0,19646$  [Pa.s] a hustota  $\rho = 893$  [m<sup>3</sup>/kg]. V této části práce bude testován vliv viskozity (Tab.č.5) na proudění uvnitř zubové mezery. Pro tyto testy byly zvoleny následující hodnoty :

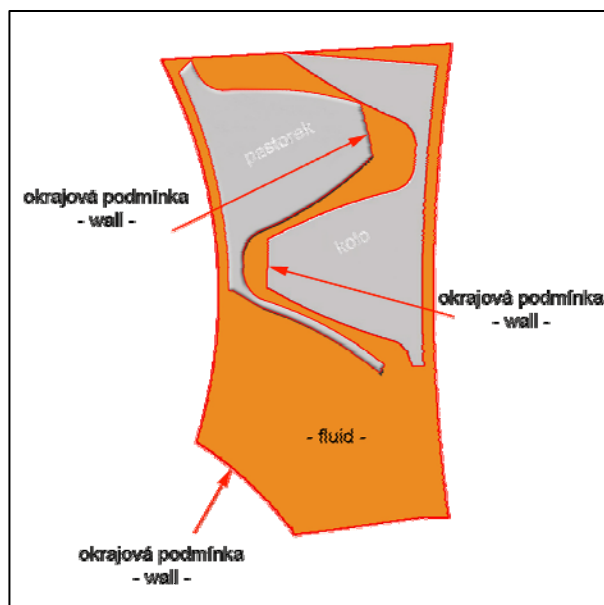
Tabulka č.5

dynamická viskozita
0,05 [Pa.s]
0,1 [Pa.s]
0,15 [Pa.s]
0, 2[Pa.s]

### 3.3.3.5 Okrajové podmínky

Změnou geometrie modelu byly odstraněny okrajové podmínky typu - outflow. Tím bylo dosaženo zlepšení výsledků, neboť okrajové podmínky ovlivňovaly řešení. V tomto modelu byly použity okrajové podmínky typu - wall a pro objem obklopující ozubené soukolí podmínka typu – fluid (Obr.3.13). Okrajové podmínky byly načteny společně s geometrií z programu Gambit.

Obr.3.13 – použité okrajové podmínky



#### 3.3.3.6 Sledování dějů v zubové mezeře

V tomto modelu byly sledovány děje v zubové mezeře pomocí animace, která se vytvořila z obrazů tlakového, rychlostního pole a rozložení fází pro každý časový okamžik v zubové mezeře.

#### 3.3.3.7 Nastavení programu Fluent

Bude naznačen postup nastavení výpočetního programu a budou zmíněna pouze nastavení, která v předchozích modelech nebyla použita.

1. Načtení vytvořené geometrie z programu Gambit
2. Nastavení řešiče
3. Nastavení modelu turbulence
4. Nastavení vícefázového modelu
5. Nastavení vlastností materiálů
6. Okrajové podmínky
7. Vytvoření a načtení knihovny
8. Nastavení pohybu pastorku
9. Nastavení výpočtu
10. Nastavení počátečních podmínek

## 11 .Tvorba olejové vrstvy

Byl vytvořen olejový film tloušťky 1mm použitím funkce ve výpočetním programu Fluent. Nejdříve byla vytvořena oblast podél zvolené geometrie a dále této oblasti byla přidělena fáze oleje. V nabídce menu bylo zvoleno :

*Adapt → Boundary → Normal Distance*

- 12. Přiřazení fáze pro vytvořenou oblast
- 13. Sledování reziduí
- 14. Nastavení animací
- 15. Nastavení časového kroku, počet kroků a iterací

### 3.3.4 Čtvrtý numerický model

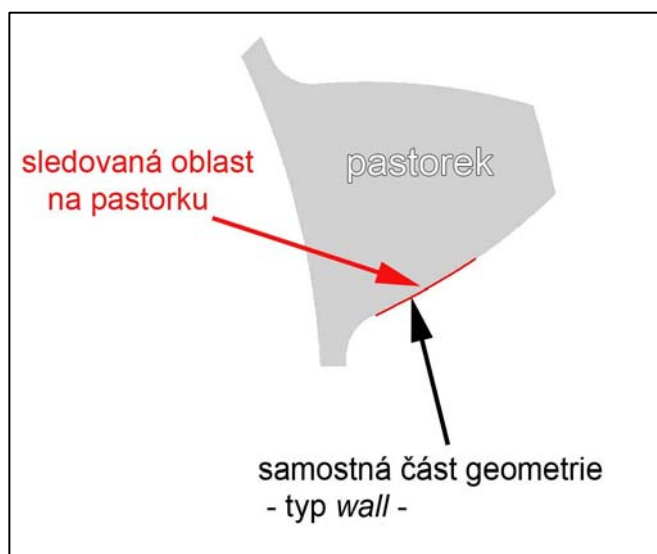
Model vychází ze třetího geometrického modelu (viz 3.1.3), je nastaven shodně jako předcházející numerický model. Změna u tohoto modelu je pouze ve členění geometrie a ve způsobu zapisování a sledování hodnot v zubové mezeře (Obr.3.14). Model je sestaven na základě zkušeností z předcházejících modelů, a byly odstraněny nedostatky a doplněny metody pro sledování dějů v zubové mezeře - na geometrii pastorku.

Nastavení programu Fluent zůstává stejné jako ve třetím numerickém modelu (viz 3.3.3), bude zmíněn pouze stručný popis pro automatické zapisování hodnot podél zvolené geometrie.

#### 3.3.4.1 Nastavení automatického zapisování hodnot

Díky tomuto nastavení byly vypisovány hodnoty tlaků podél zvolené geometrie. Byla zvolena část zubu na pastorku mezi patní a roztečnou kružnicí (Obr.3.14).

Obr.3.14 – naznačení členění geometrie zubu ozubeného kola



V programu Fluent bylo vytvořeno makro, pomocí kterého se zapisovaly hodnoty tlaků ve vyznačené oblasti v každém časovém kroku.

*Solve → Execute Command → Define Macro*

Po tomto příkazu byl proveden zápis požadovaných hodnot do souboru pro zvolenou geometrii. Bylo ukončeno makro a nastaveno tak, aby se provedlo v každém časovém kroku výpočtu.

### 3.4. Metody vyhodnocení výsledků

Ke zkoumání dějů v zubové mezeře byly použity celkem čtyři numerické modely a způsoby vyhodnocování výsledků se liší. V každém numerickém modelu bylo dosaženo dílčího závěru, který byl základem dalšího výzkumu. V této kapitole budou popsány způsoby pozorování dějů v zubové mezeře.

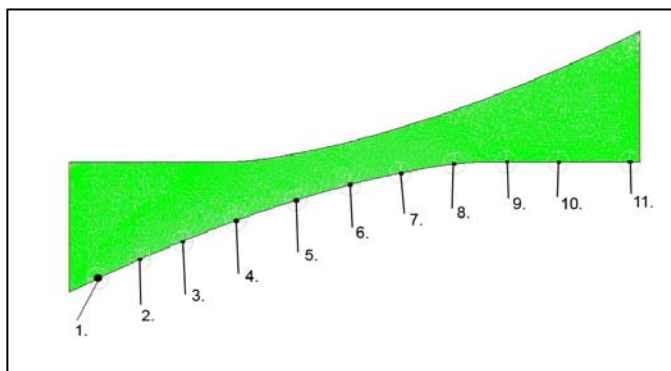
#### 3.4.1 Vyhodnocení prvního a druhého numerického modelu

**Cíl :** Sledování tlakových i rychlostních polí a rozložení „olej-vzduch“ v zubové mezeře při konstantní hodnotě viskozity  $\mu = 0,19646$  [Pa.s] a otáčkách  $n = 1500$  [ot/min].

Děje v zubové mezeře byly sledovány dvěma mechanismy.

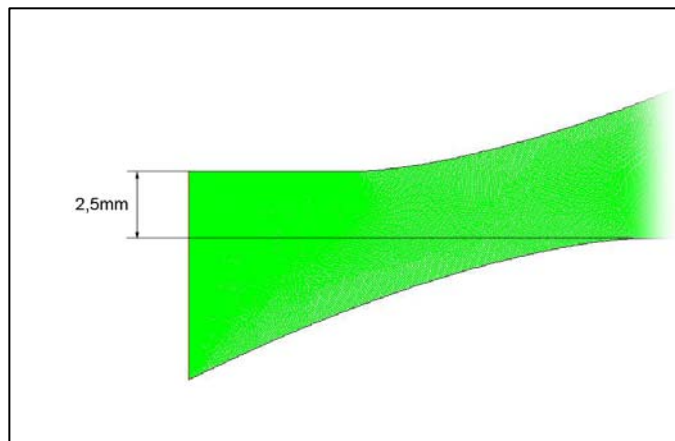
- a) Prvním způsobem byl sledován celý prostor zubové mezery. Bylo sledováno tlakové a rychlostní pole v každém časovém kroku. U více-fázového modelu bylo sledováno i rozložení „olej-vzduch“.
- b) Druhý způsob spočíval ve vytvoření 11 bodů podél profilu geometrie (Obr.3.15). V těchto bodech byly zapisovány hodnoty tlaků v 10-ti stejně velkých intervalech.

Obr.3.15 – body, ve kterých byly sledovány hodnoty tlaku



Na počátku řešení byly části zubů od sebe vzdáleny 2,5mm (*Obr.3.16*). Pro časové intervaly budou uvedeny hodnoty tlaků a velikost mezery mezi zuby.

*Obr.3.16 - velikost mezery na počátku řešení*



### 3.4.2 Vyhodnocení třetího numerického modelu.

**Cíl .:** Ověřit, zda se i v tomto numerickém modelu vyskytují tlakové extrémy jako u předcházejícího numerického modelu.

Zjistit, zda velikost časového kroku a hustota výpočetní sítě způsobí potlačení výskytu tlakových extrémů.

Vyšetřit, zda se hodnota viskozity projeví na výskytu tlakových extrémů.

Pro test časového kroku byly voleny tři hodnoty :

*Tabulka č.6*

časový krok dT
1e-7 [s]
1e-8 [s]
1e-9 [s]

Pro test hustoty sítě byly voleny tři velikosti sítě :

*Tabulka č.7*

počet elementů sítě
50,000
100,000
150,000

Pro ověření vlivu viskozity na vznik výskytu tlakových extrémů byly voleny hodnoty :

*Tabulka č.8*

<b>dynamická viskozita</b>
0,05 [Pa.s]
0,1 [Pa.s]
0,15 [Pa.s]
0,2 [Pa.s]

Nástrojem pro sledování tlakových extrémů v zubové mezeře byly animace zachycující tlakové pole. Jako dodatečné informace o dějích probíhajících v zubové mezeře bylo zaznamenáváno rychlostní pole a rozložení oleje vzduchu.

### 3.4.3 Vyhodnocení čtvrtého numerického modelu.

**Cíl :** Popsat četnosti tlakových minim na pastorku ozubeného kola mezi patní a roztečnou kružnicí.

Popsat četnosti tlakových minim v závislosti na : viskozitě

šířce zubové mezery

velikosti otáček pastorku

geometrii zubů

Pro vyhodnocení četností minim tlaků v závislosti na uvedených parametrech byla vytvořena funkce v programu Fluent, díky ní byl získán datový soubor obsahující informace o velikosti tlaku v určitém místě geometrie pro každý časový okamžik. Zpracování a analýza výsledků probíhala v programu Matlab.

Pro větší výpovědní hodnotu výsledků byly provedeny následující úpravy :

- a) Sledovaná část geometrie byla rozdělena na 5 intervalů (*Obr.3.17*). Díky tomu bylo možno určit, na jakém místě zubu byla četnost výskytu tlakových minim největší.

*Obr.3.17 – členění sledované oblasti*



b) Sledované četnosti podtlaků byly rozděleny dle velikosti tlakového minima (Tab.č.9).

Tabulka č.9

1. interval	0-10MPa	6. interval	50-60MPa
2. interval	10-20MPa	7. interval	60-70MPa
3. interval	20-30MPa	8. interval	70-80MPa
4. interval	30-40MPa	9. interval	80-90MPa
5. interval	40-50MPa	10. interval	90-100MPa

### 3.5 Tvorba UDF pro definování pohybu pastorku

Neboli – User define function - uživatelsky definovaná funkce. UDF lze použít například k definování okrajových podmínek, vlastností materiálu, zdrojů tepla či počátečních podmínek atd..

Zdrojový kód s UDF může být načten nebo „přeložen“ v programu Fluent. V prvním případě je kód přímo načten do run-time knihovny. Ve druhém případě je nejdříve vytvořena knihovna a poté načtena do Fluentu.

#### Postup tvorby UDF :

- tvorba zdrojového kódu – soubor \*.c
- musí být definováno makro ( předdefinováno programem Fluent)
- načtení nebo vytvoření knihovny

Pro definování pohybu částí modelu byla použita funkce *Dynamic mesh define macros* - `DEFINE_CG_MOTION`, jejíž pomocí lze definovat úhlovou i přímočarou rychlost v každém časovém kroku. Program Fluent používá tyto rychlosti k obnovení pozice bodů (geometrie) typu wall nebo solid. Danou funkci lze aktivovat pouze kompilací do programu Fluent.



### **Ukázka souboru UDF pro definici pohybu (použito v prvním numerickém modelu)**

```
#include "udf.h"

DEFINE_CG_MOTION(x,dt,vel,omega,time,dtime)
{
    NV_S(vel,=,0.0);
    NV_S(omega,=,0.0);
    if(!Data_Valid_P ())
        return;
    vel[0]=0;                - rychlost ve směru x
    vel[1]=-0.8042;          - rychlost ve směru y
}
```

### **Ukázka programu pro úhlovou rychlost :**

```
#include "udf.h"

DEFINE_CG_MOTION(x_1,dt,vel,omega,time,dtime)
{
    omega[0] = 0.0;          - úhlová rychlost kolem osy rotace x
    omega[1] = 0.0;          - úhlová rychlost kolem osy rotace y
    omega[2] = -157.08;       - úhlová rychlost kolem osy rotace z
}
```

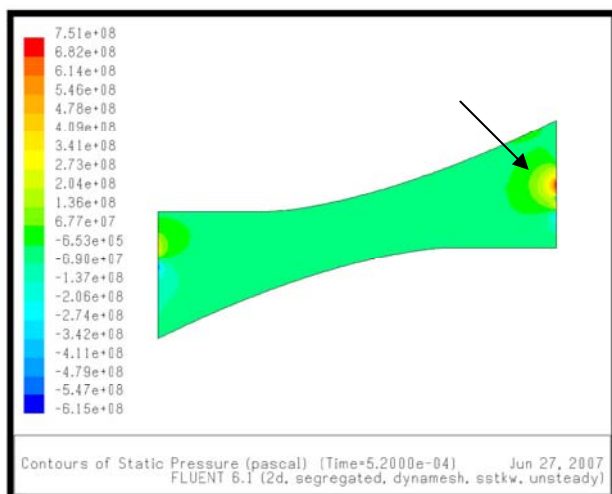
## 4. Výsledky numerických simulací

Byly postupně vyhodnoceny jednotlivé numerické modely, protože výsledky na sebe navazují. Na základě jednotlivých výsledků se přijala opatření a návrhy dalších postů při zkoumání dějů v zubové mezeře.

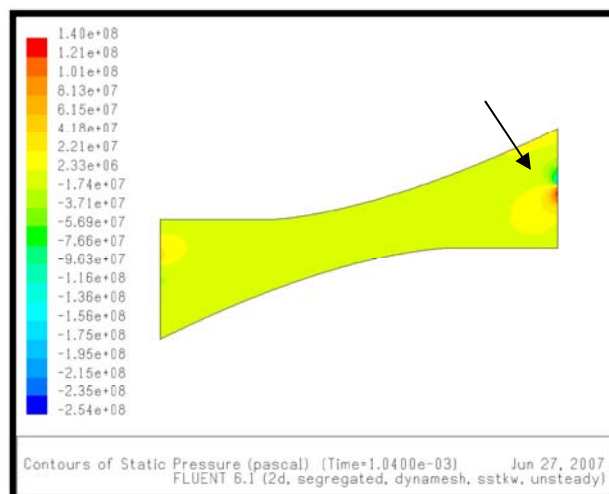
### Vyhodnocení prvního numerického modelu

V tomto modelu bylo sledováno tlakové a rychlostí pole a hodnoty tlaků v 11 bodech geometrie pro 10 intervalů přiblížení částí zubů.

Obr.4.1a – tlakové pole v čase  $t = 5,2e-4s$

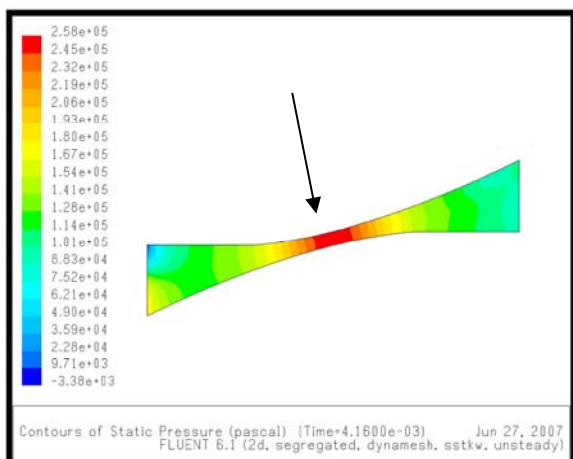


Obr.4.1b – tlakové pole v čase  $t = 1,04e-4s$

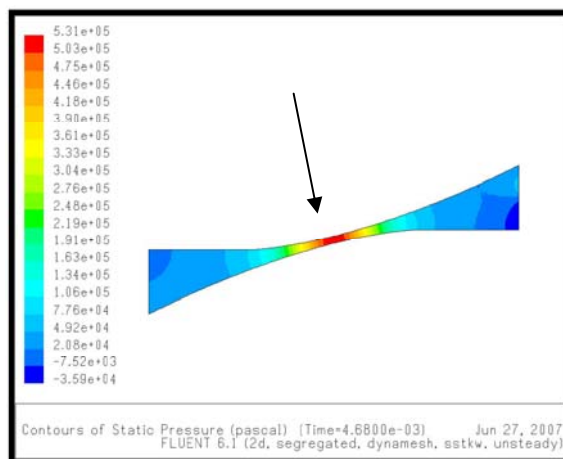


Na obrázcích 4.1a,b je znázorněno tlakové pole při přibližování zubů k sobě. Z obrázků tlakových polí je patrné, že okrajová podmínka typu *outflow* nepříznivě ovlivňuje tlakové pole v její blízkosti.

Obr.4.1c – tlakové pole v čase  $t = 4,16e-3s$



Obr.4.1d – tlakové pole v čase  $t = 4,68e-3s$



Při těsném přiblížení zubů k sobě je největší tlak v nejtenčím místě zubové mezery (Obr.4.1c,d), odkud vytéká olej nejobtížnější a dochází k výraznému nárůstu tlaku.

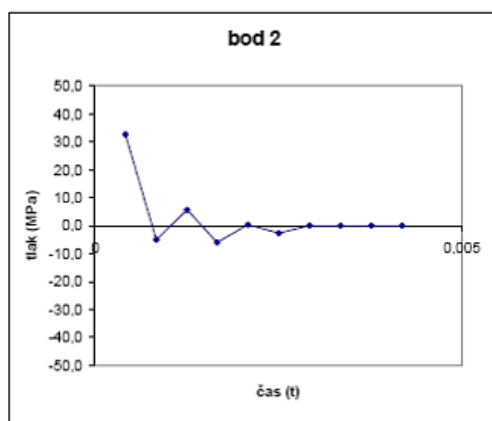
V tabulce č.10 jsou hodnoty tlaků ve zvolených bodech a časových intervalech.

Tabulka č.10

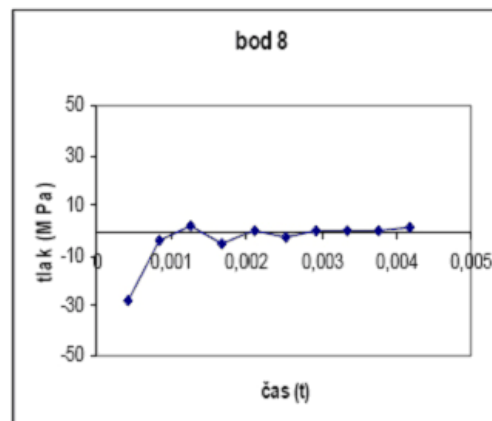
hodnoty tlaků ve zvolených bodech [Mpa]											
čas	1b	2b	3b	4b	5b	6b	7b	8b	9b	10b	11b
1	-42,369	-32,777	-32,777	-32,298	-29,209	-27,936	-27,787	-27,561	-24,103	-27,183	-40,05
2	-7,183	-5,011	-6,239	-5,684	-4,232	-3,906	-3,979	-3,494	0,274	0,57	-2,955
3	5,156	5,704	4,342	3,925	4,33	4,229	3,792	2,158	-2,584	-15,362	-21,525
4	-6,473	-5,892	-5,655	-5,249	-4,918	-4,908	-4,924	-5,026	-5,075	-6,957	-13,924
5	0,349	0,349	0,349	0,349	0,356	0,358	0,346	0,231	-0,002	-0,069	2,678
6	-2,835	-2,668	-2,51	-2,395	-2,366	-2,358	-2,362	-2,376	-2,371	-2,339	-2,592
7	-0,091	-38432,5	-0,012	-0,004	0,022	0,039	0,031	0,006	-0,016	-0,012	-0,018
8	0,146	0,124	0,128	0,151	0,211	0,257	0,232	0,172	0,136	0,118	0,098
9	0,027	0,029	0,042	0,088	0,293	0,526	0,374	0,136	0,051	0,025	-0,02
10	0,015	32797,7	0,057	0,188	2,482	21,774	6,093	1,414	1,085	1,03	1,001

Z tabulky lze zjistit, že rozdíly tlaků jsou v desítkách MPa (Tab.10). Tlak oleje v zubové mezeře nabývá záporných a kladných hodnot. Záporné hodnoty znamenají podtlaky a kladné hodnoty přetlaky. Povrch zubu je tak střídavě namáhán na tlak a tah v průběhu přibližování boků zubů k sobě (Obr.4.2a,b).

Obr.4.2a – průběh tlaku v bodě 2



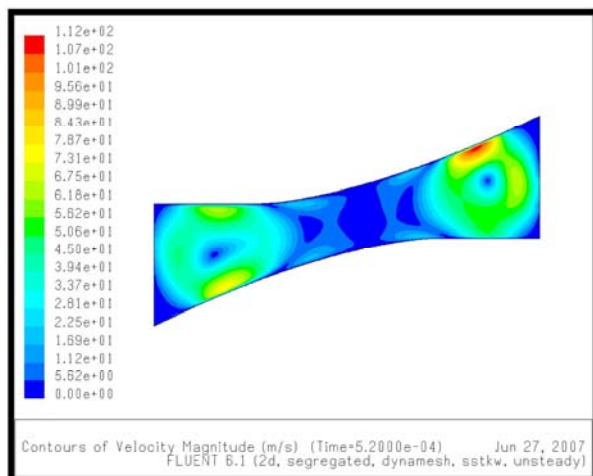
Obr.4.2b – průběh tlaku v bodě 8



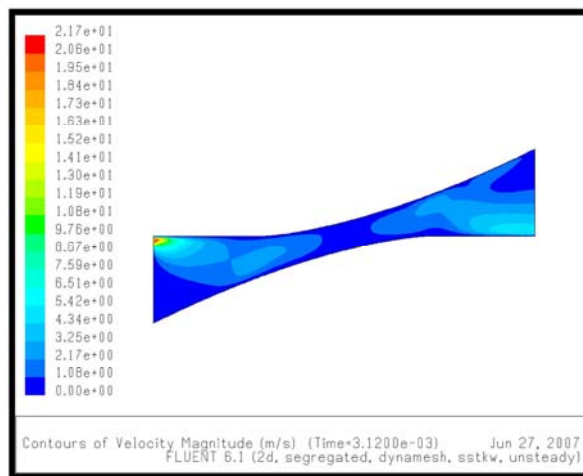
Na obrázcích 4.2a,b je znázorněn tlak ve sledovaných bodech v různých časových okamžicích, které odpovídají postupnému přibližování boků zubů k sobě. Bod č.2 (Obr.4.2a) je na okraji sledované oblasti a bod č.8 (Obr.4.2b) je uprostřed sledované oblasti. Obrázky znázorňují rozdílný průběh tlaků v závislosti na poloze sledovaného bodu. Časový průběh tlaků všech bodů je zobrazen v příloze (příloha – obr.4.2a,k).

Na obrázcích 4.3a-d je znázorněno rychlostní pole uvnitř zubové mezery.

Obr.4.3a – rychlostní pole,  $t = 5,2e-4s$

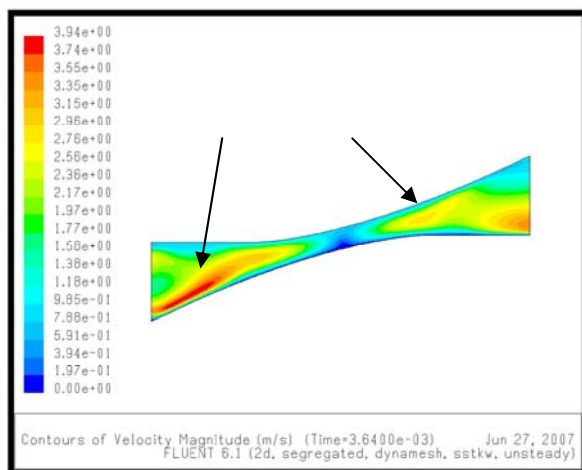


Obr.4.3b – rychlostní pole,  $t = 3,12e-3s$

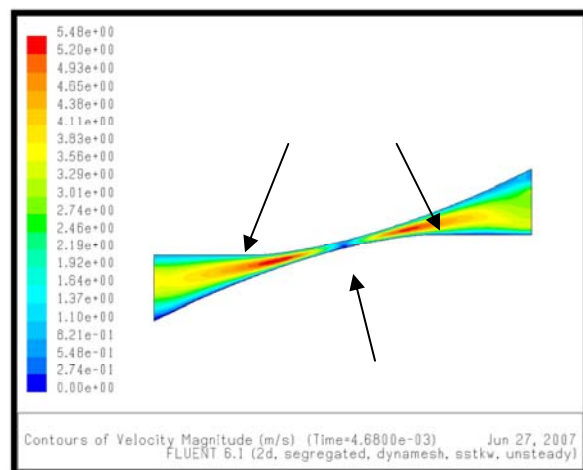


Zpočátku je olej snadno vytlačován z mezery (Obr.4.3a,b), při větším přiblížení se zmenšuje prostor, kudy olej může vytékat. Tímto vlivem roste rychlost proudění oleje.

Obr.4.3c – rychlostní pole,  $t = 3,64e-3s$



Obr.4.3d – rychlostní pole,  $t = 4,68e-3s$



Vlivem viskozity oleje při velkém přiblížení zubů se olej těžce vytlačuje ze zubové mezery. V bodě dotyku zubů je lze pozorovat malou rychlost proudění (obr.4.3c,d) a vysoký tlak, který dále roste.

**Výsledky studie :**

Tlak v zubové mezeře má pulzující charakter. Jsou patrné rozdíly průběhu tlaku mezi body v blízkosti místa dotyku zubů a body ležícími vně uvažované geometrie. Rozdíly tlaků mezi jednotlivými časovými okamžiky jsou v řádu desítek MPa. Přetlaky a podtlaky jsou pozorovány v intervalu  $T = 0,00053\text{s}$ .

**Další postup :**

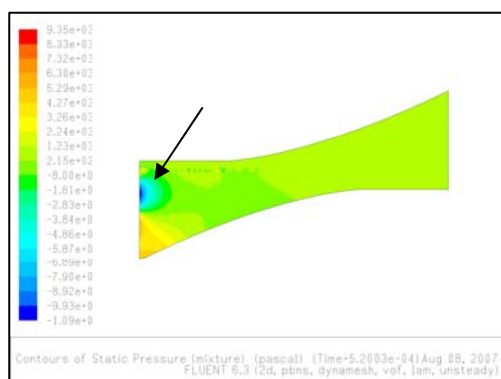
Je třeba vyšetřit průběh tlaků mezi uvažovanými časovými intervaly, odstranit vliv okrajových podmínek a ověřit chování oleje v zubové mezeře na dvoufázovém modelu.

## 4.2 Vyhodnocení druhého numerického modelu

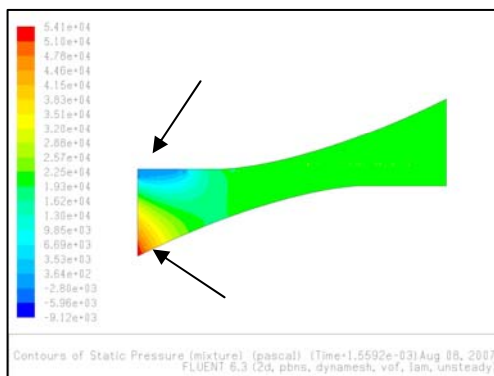
Pomocí tohoto modelu bylo sledováno tlakové a rychlostní pole v zubové mezeře, navíc i rozložení oleje a vzduchu při záběru zubů ozubených kol a vliv dvou-fázového modelu na výsledky z předešlého modelu.

### Tlakové pole

Obr. 4.4a – tlakové pole,  $t = 5,2e-4s$

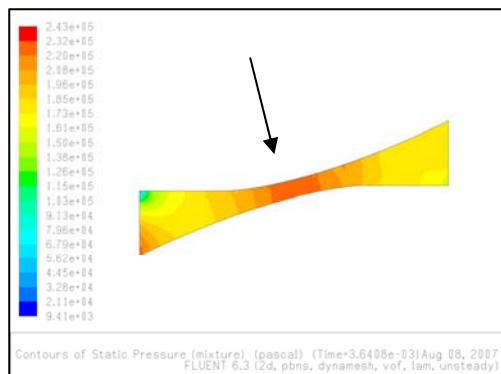


Obr. 4.4c – tlakové pole,  $t = 5,2e-4s$

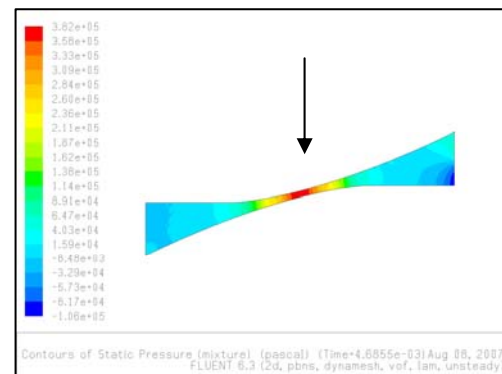


Na obrázku 4.4a,c je vidět vliv okrajové podmínky typu – wall. V tomto případě se jedná o dvou-fázový model.

Obr. 4.4g – tlakové pole,  $t = 3,64e-3s$



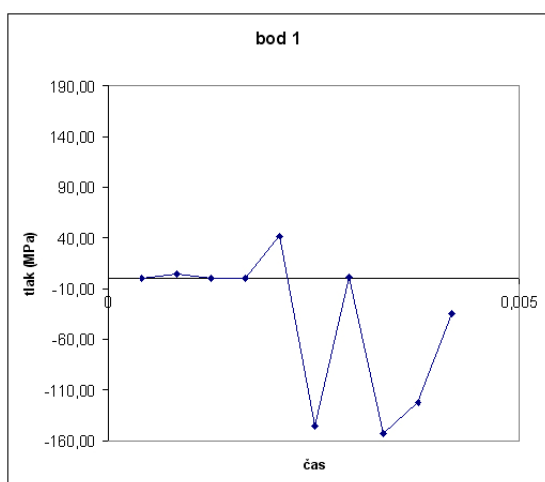
Obr. 4.4i – tlakové pole,  $t = 4,685e-3s$



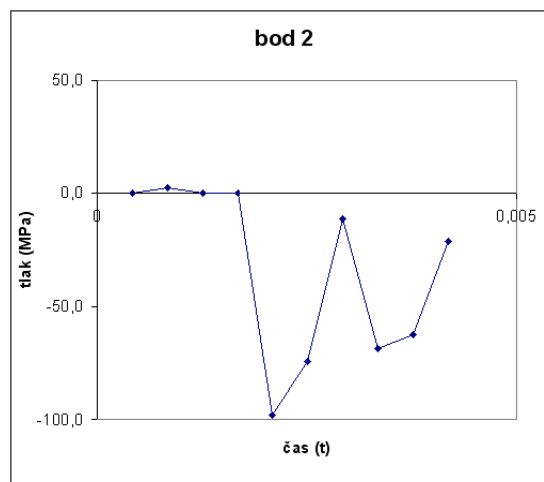
Vysoké tlaky opět nastávají v nejtenčích místech zubové mezery (Obr.4.4g,i). Olej není schopen vytékat z této oblasti, a proto zde dochází k vysokým tlakům. Zobrazení tlakových polí ve sledovaných časových okamžicích je uvedeno v příloze (příloha – Obr.4.4a-j).

Časový průběh hodnot tlaků ve všech zvolených bodech je uveden v tabulce č.11 (příloha).

Obr. 4.5a – průběh tlakové pole

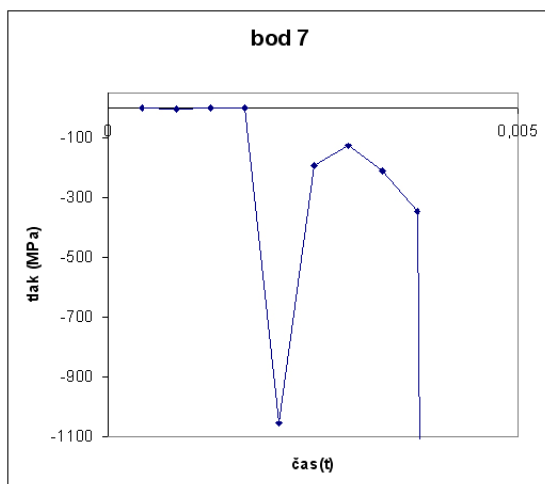


Obr. 4.5b – průběh tlakové pole

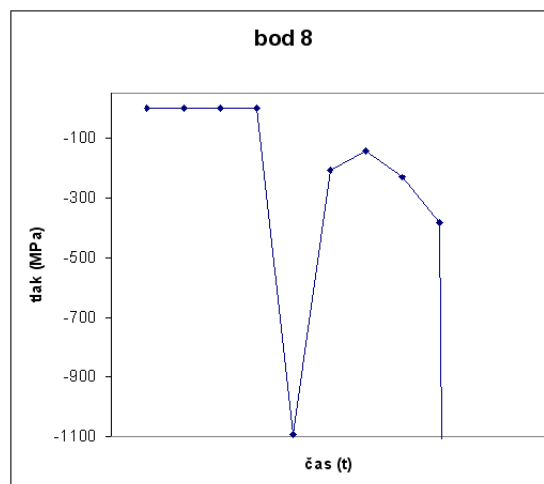


Obrázky zobrazují hodnoty tlaků ve zvolených bodech v různých časech během průběhu přibližování zubů k sobě. Obrázky 4.5a,b zobrazují průběh tlaků v krajních bodech geometrie a obr.4.5g,h průběh tlaku ve střední části geometrie, kde dojde ke „kontaktu“ zubů. Průběhy tlaků ve všech bodech jsou uvedeny v příloze (příloha – Obr.4.5a-j).

Obr. 4.5g – průběh tlakové pole



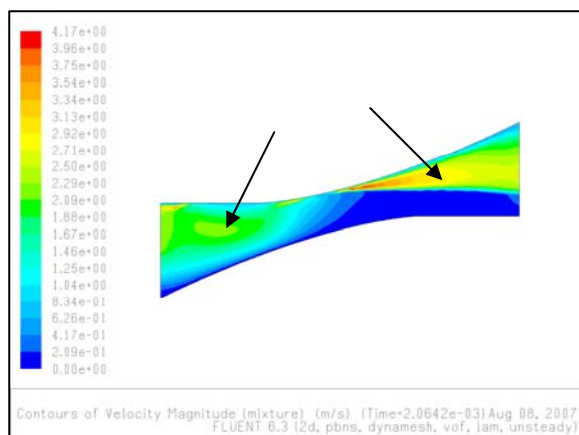
Obr. 4.5h – průběh tlakové pole



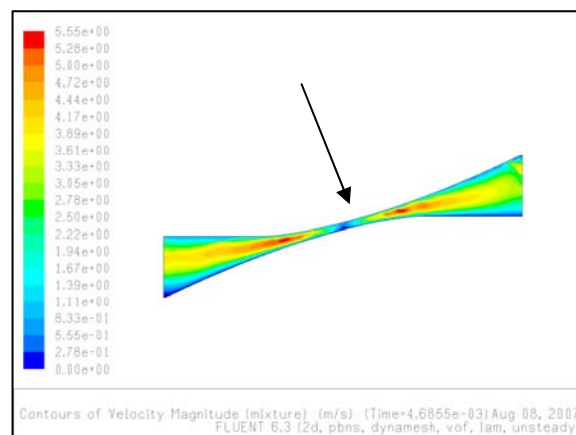
Průběh tlaku má opět pulzující charakter, avšak hodnoty velikosti tlaků se výrazně liší oproti předcházejícímu modelu. Tuto skutečnost zřejmě způsobily okrajové podmínky v modelu a také rozdíl v uvažování jednofázového a dvoufázového modelu.

## Rychlostní pole

Obr. 4.6d – rychlostní pole,  $t = 2,064e-3s$



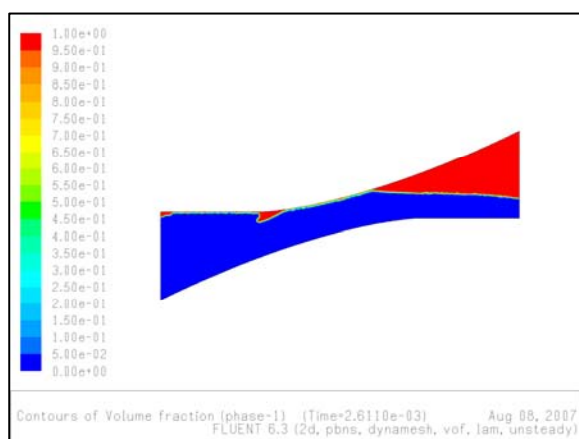
Obr. 4.6i – rychlostní pole,  $t = 4,685e-3s$



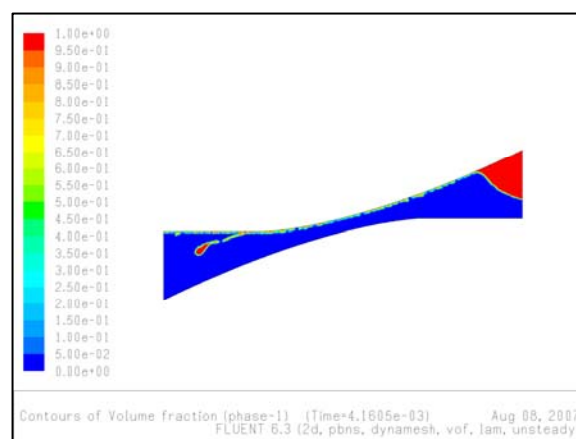
Na obrázcích 4.6d,i je vidět rozvíjející se rychlostní pole. Vlivem přibližování částí zubů se zmenšuje prostor zubové mezery. Lze sledovat rychlost vzduchu, která je výrazně vyšší než rychlost oleje. Obrázek 4.6i zobrazuje boky zubů těsně před dosednutím. V tomto okamžiku je vysoký tlak v bodě dosednutí a naopak rychlost velmi nízká. Obrázky zobrazující rychlostní pole v časových intervalech jsou uvedeny v příloze (příloha - Obr.4.6a-j).

## Rozložení oleje a vzduchu

Obr. 4.7e –  $t = 2,611e-3s$



Obr. 4.6h –  $t = 4,16e-3s$

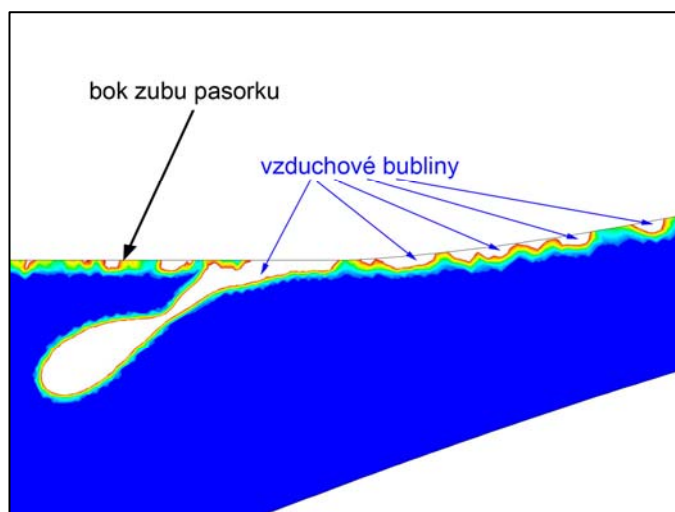


Na obrázcích 4.7e,h je zobrazeno rozložení oleje a vzduchu v pozorovaných časových intervalech. Z obrázku je možné sledovat, jakým způsobem olej pokrývá zub a také to, že mazání zubů je nedokonalé.



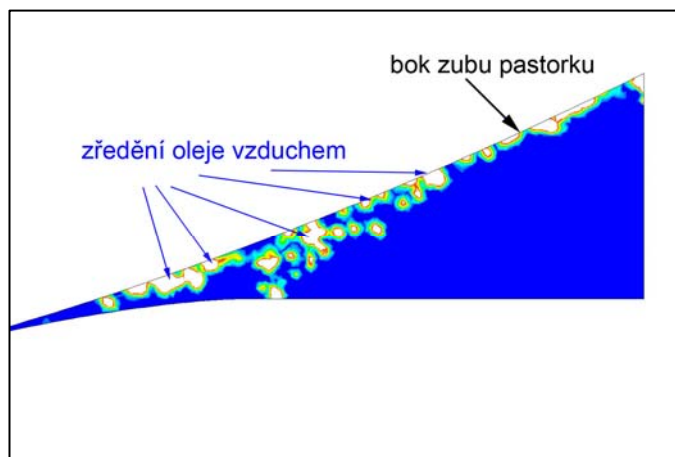
Obr.4.8a - rozložení oleje a vzduchu

Na obr.4.8a jsou v detailu zobrazeny vzduchové bubliny, které se dostaly do zubové mezery při přibližování zubených kol.



Obr.4.8b - rozložení oleje a vzduchu

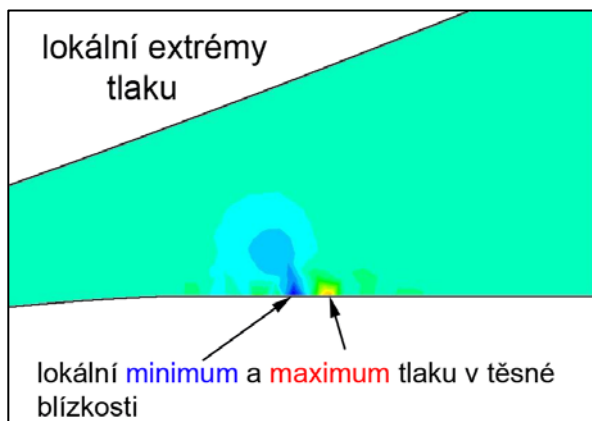
Z obrázku je dobře patrné, že profil zubu nemusí být zcela pokryt olejem (obr.4.8a,b). To má za následek špatné mazání zubu a jeho možné poškození. S rostoucím objemem vzduchu v oleji se mění vlastnosti dané směsi. (v numerické simulaci neuvažujeme možné sycení oleje vzduchem)



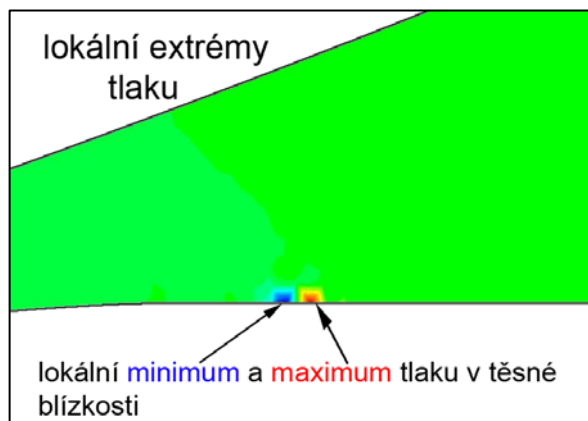
Obrázky (příloha – obr.4.7a-j) rozložení oleje a vzduchu demonstrují možnosti numerické simulace. Vliv a způsob mazání zubů však není cílem této práce.

Při zkoumání dějů v zubové mezeře mezi jednotlivými časovými intervaly bylo nutné snížit časový krok. Při tomto snížení jsme získali tlakové pole, které bylo opět pulzující, ale především byly objeveny lokální extrémy tlakového pole v oblasti boku zubů jednotlivých ozubených kol (Obr.4.9a,b).

Obr.4.9a - lokální extrémy tlaku



Obr.4.9b - lokální extrémy tlaku



Výskyt lokálních extrémů by mohl vysvětlovat poškození zubů ozubených kol. Na malém elementu plochy se vyskytuje vysoký podtlak a přetlak. Tlaky způsobují namáhání elementu zubu na tlak i tah současně v těsné blízkosti. Daným jevům bude v dalších kapitolách věnována pozornost.

#### **Výsledek studie :**

Výsledky druhého numerického modelu potvrzují výsledky prvního modelu, který prokázal pulzující charakter tlakového pole.

Byl zobrazen průběh nedokonalého mazání zubu ozubeného kola, který by se mohl stát podkladem pro další práci.

Byly objeveny lokální extrémy tlaků při nižším časovém kroku, tyto budou dále sledovány.

#### **Další postup :**

Ověřit výskyt lokálních extrémů na jiném numerickém modelu, který bude lépe vystihovat geometrii zubů, a budou odstraněny nežádoucí okrajové podmínky.

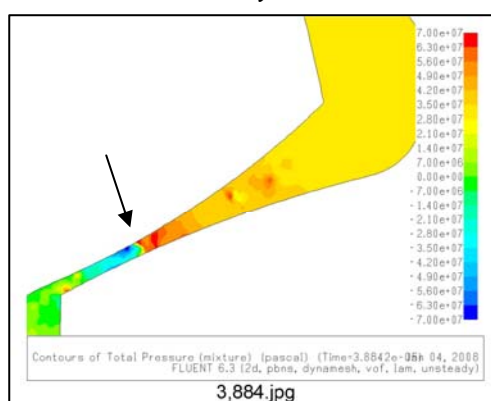
### 4.3 Vyhodnocení třetího numerického modelu

Úkolem třetího numerického modelu bylo zjistit, zda se lokální minima tlaku vyskytují i v tomto modelu, který lépe popisuje geometrii zubu a není zatížen chybou způsobenou okrajovou podmínkou a zda se lokální extrémní tlaků objeví i pro různé hodnoty viskozity. Dále by model měl ověřit zda lokální extrémní tlaků nejsou způsobené numerickou chybou vlivem časového kroku a velikostí sítě.

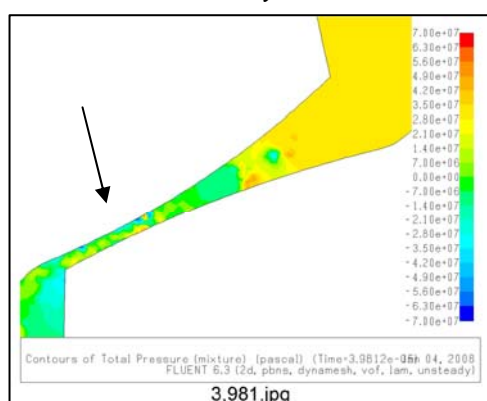
Na tomto třetím modelu byly opět objeveny tlakové extrémity v lokálních místech geometrie. Díky novému modelu lze sledovat přesněji v jakých místech geometrie se extrémní tlaků vyskytují.

#### 4.3.1. Ověření výskytu lokálních minim tlaku

Obr. 4.10a – extrémní tlaku,  $t = 3,884e-4s$

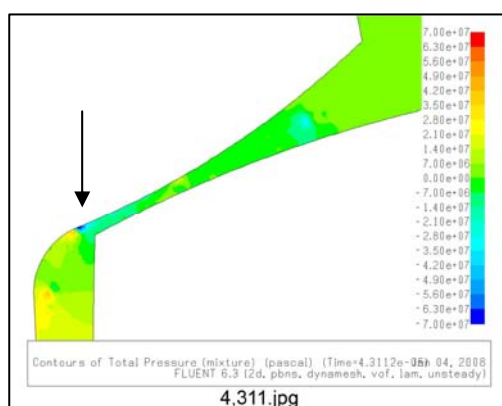


Obr. 4.10b – extrémní tlaku,  $t = 3,981e-4s$

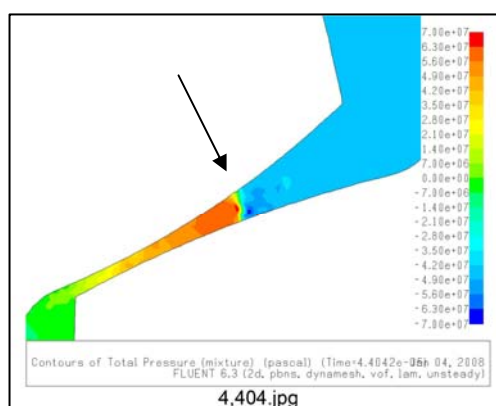


Lokálního minima tlaku se vyskytují na stěně mezi patní a roztečnou kružnicí (Obr.4.10a,b). Dohází ke vzniku intenzivního podtlaku na malé plošce, který se opakuje s velkou četností během provozu ozubených kol. Tento podtlak může být důvodem vytrhávání velmi malých částíček ozubeného kola.

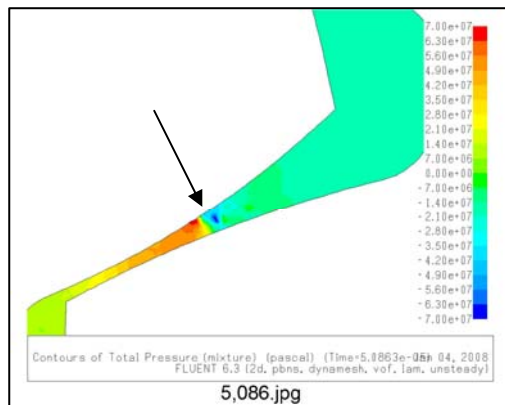
Obr. 4.10c – extrémní tlaku,  $t = 4,311e-4s$



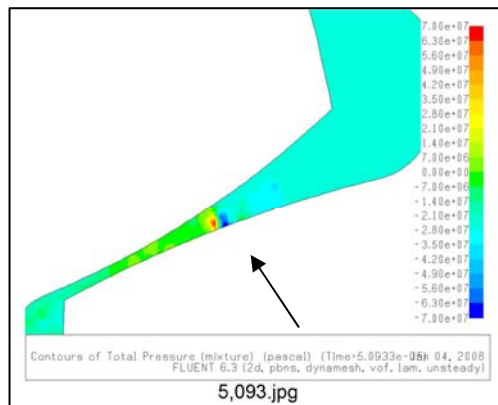
Obr. 4.10d – extrémní tlaku,  $t = 4,404e-4s$



Obr. 4.10e – extrémny tlaku,  $t = 4,311e-4s$



Obr. 4.10f – extrémny tlaku,  $t = 4,404e-4s$

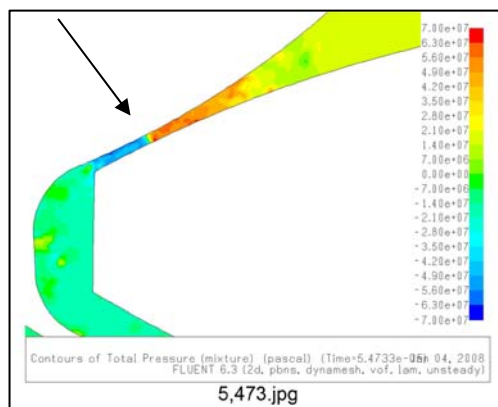
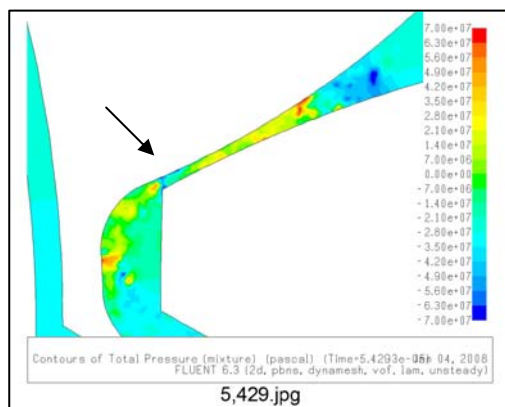


Lokální extrémny tlaků se vyskytují v různých variacích. Bylo sledováno „osamocené“ lokální minimum tlaku. Někdy bylo lokální minimum doprovázeno lokálním extrémem tlaku velmi blízko místa výskytu lokálního podtlaku (Obr.4.10c,d,e,f). Dále byly pozorovány lokální extrémny, kdy se nachází jeden extrém v jednom časovém okamžiku, jak na hnacím kole, tak i na hnacím kole. Při výskytu obou lokálních extrémů na malé ploše je zub extrémně namáhán na tah i tlak.

Lokální minimum tlaku se objevuje mnohokrát během procesu přibližování zubů do záběru. Místo se mění, ale téměř vždy se lokální extrémny tlaků vyskytují mezi roztečnou a patní kružnicí (příloha Obr.4.10g,h)

Minimální tlak se může objevit jak na malé ploše, tak i na větší. Na obrázku 4.10i,j je hnací i hnací ozubené kolo zatížené podtlakem.

Obr. 4.10i – extrémny tlaku,  $t = 5,429e-4s$  Obr. 4.10j – extrémny tlaku,  $t = 5,473e-4s$



V případě vzniku minima tlaku na obou plochách zubů současně je u hnacího kola ve většině případů pod patní kružnicí a u hnaného kola i nad roztečnou kružnicí. Dochází k intenzivnějšímu poškození hnacího kola (*příloha – Obr.4.10m,n*).

#### 4.3.2 Výskyt tlakových minim pro různé hodnoty dynamické viskozity

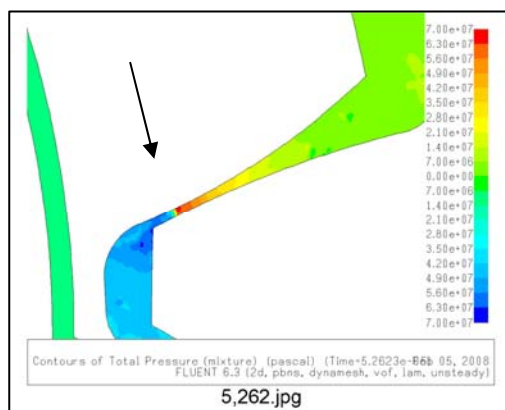
V další části sledování dějů v zubové mezeře je zkoumán vliv hodnoty viskozity (*Tab.č.12*) na výskyt lokálních extrémů tlaku. Bylo použito pět hodnot viskozity pro zkoumání tlakových extrémů.

Tabulka č.12

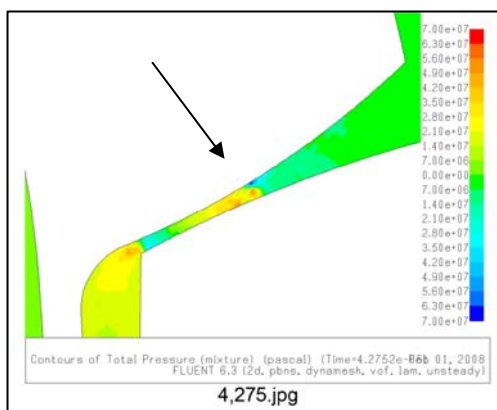
viskozita
0,05 [Pa.s]
0,1 [Pa.s]
0,15 [Pa.s]
0,19646 [Pa.s]
0,25 [Pa.s]

Během celého výpočtu byly ukládány snímky tlakového pole, které byly poté vyhodnoceny. Byly hledány tlakové extrémy pro všechny hodnoty viskozity.

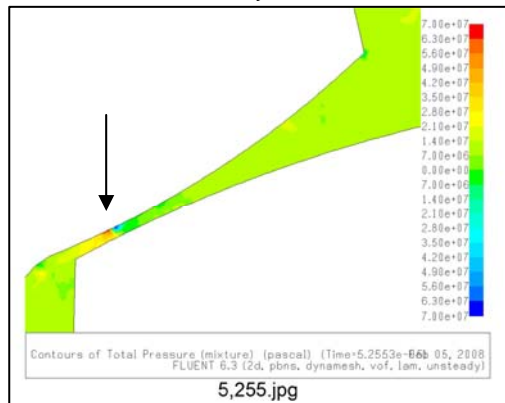
Obr. 4.11b – extrémy,  $t = 5,262e-4s$



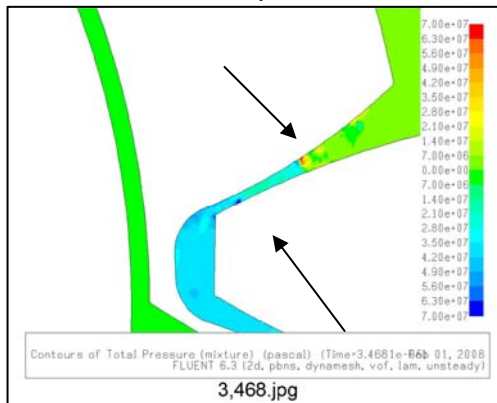
Obr. 4.12a – extrémy tlaku,  $tt = 4,275e-4s$



Obr. 4.13c – extrémy tlaku,  $t = 5,255e-4s$



Obr. 4.14a – extrémy tlaku,  $t = 3,468e-4s$

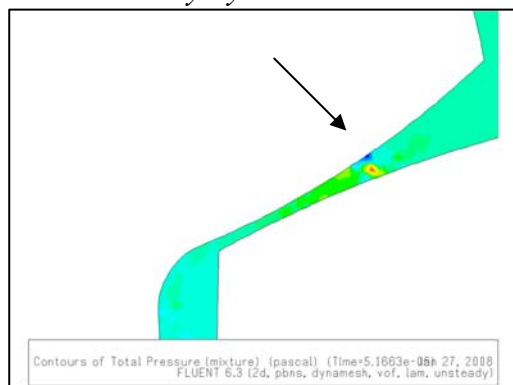


Existence lokálních extrémů tlaků byla potvrzena pro dynamickou viskozitu 0,05[Pa.s] (*Obr.4.11b*), dynamickou viskozitu 0,10[Pa.s] (*Obr.4.12a*), dynamickou viskozitu 0,15[Pa.s] (*Obr.4.13c*) a dynamickou viskozitu 0,25[Pa.s] (*Obr.4.14a*). Při bližším zkoumání výskytu tlaků byly pozorovány opět různé variace výskytu tlaku tak jako pro dynamickou viskozitu 0,19646[Pa.s] (*příloha – obr. 4.11-obr.4.14*).

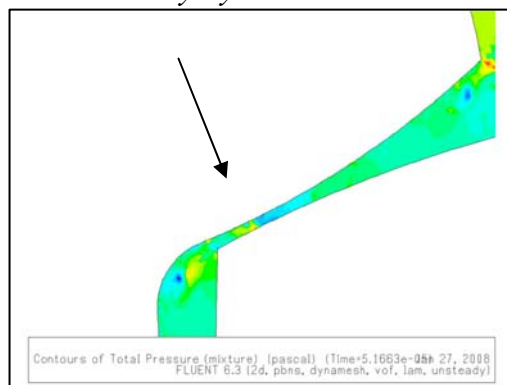
### 4.3.3 Výskyt tlakových minim pro různé velikosti sítě a časový krok

Bylo sledováno, zda počet elementů sítě bude mít vliv na výskyt lokálních tlakových minim. Byly použity tři velikosti sítě s počtem elementů : a) 50,000 b)100,000 c)150,000 elementů

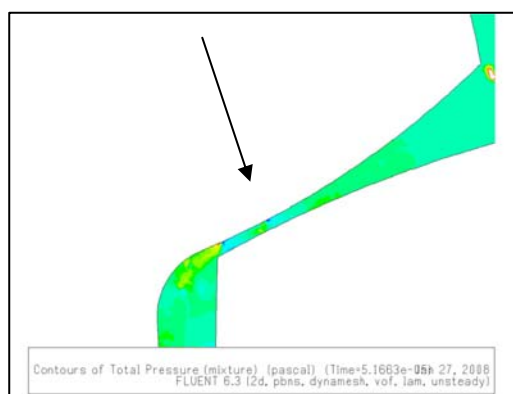
*Obr.4.15a – výskyt extrému tlaku*



*Obr.4.15b – výskyt extrému tlaku*



*Obr.4.15c – výskyt extrému tlaku*



Výskyt lokálních extrémů tlaku byl potvrzen pro různé velikosti sítě a) 50,000 elementů (*Obr.4.15a*), b) 100,000 elementů (*Obr.4.15b*), c) 150,000 elementů (*Obr.4.15c*). Protože se lokální tlaky objevují pro různé hustoty sítě, lze říci, že výskyt tlakových minim není způsoben nedostatečnou hustotou sítě. Stejný test byl proveden pro různé časové kroky (*Tab. č.6*). Výskyt tlakových minim byl ověřen pro všechny časové kroky (*příloha – Obr.4.15d,e*).

**Získané výsledky :**

Dosavadní výsledky poukazují na existenci velmi nízkého podtlaku na povrchu zubu, přičemž tento podtlak se objevuje zhruba 130-krát během přibližování zubů k sobě.

V drtivé většině vzniká lokální podtlak na povrchu zubu mezi roztečnou a patní kružnicí. V těchto místech je zatížení nejintenzivnější a bude zde docházet k poškození povrchu zubu vytrháváním materiálu.

Povrch zubu hnaného kola může být zatížen podtlakem rovněž, ovšem tento podtlak se objevuje mezi hlavovou a patní kružnicí, a tudíž eventuální poškození probíhá pomaleji a pravděpodobně dojde k poškození povrchu zubu až v delším časovém horizontu.

Vznik zatížení povrchu zubu lokálním podtlakem se objevuje u jakékoli změny viskozity oleje a pravděpodobně samotné zatížení není závislé na viskozitě oleje. K poškozování povrchu zubu bude docházet jak při přerušovaném provozu, kdy se olej neohřeje na vyšší teplotu, tak i při kontinuálním provozu, kdy teplota a hodnota viskozity bude konstantní.

**Další postup :**

Doposud identifikovaný jev lokálního podtlaku a jeho intenzita a četnost výskytu bude vyhodnocena číselně umožňující jeho další podrobnější posouzení.

#### 4.4 Vyhodnocení čtvrtého numerického modelu

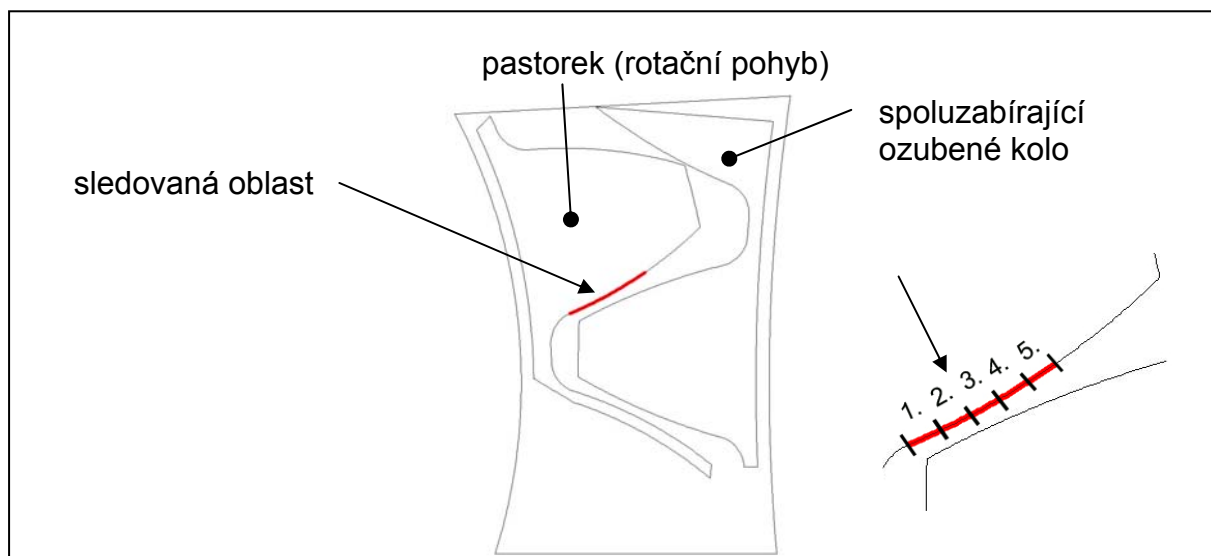
Čtvrtý numerický model byl sestaven tak, aby bylo možné vyhodnocovat četnosti tlaků na uvažované geometrii. Díky informaci o velikosti tlaku v každém časovém okamžiku, místu výskytu a čase výskytu bylo možné provést analýzu dat získaných z numerické simulace.

Na základě dat ze simulací byly statisticky vyhodnoceny četnosti tlaků v závislosti na hodnotě dynamické viskozity a rychlosti otáček. Ve vyhodnoceních byly brány v úvahu velikosti tlaků a místa výskytu tlakových extrémů.

##### 4.4.1 Vliv viskozity na tlaková minima v zubové mezeře

Cílem je popsat tlaková minima, která se objevují v zubové mezeře, zejména jejich četnosti výskytu a závislost na dynamické viskozitě.

*Obr. 4.16 – schéma modelu - znázornění oblasti pro sledování tlakových minim*



Sledovaná oblast (*Obr. 4.16*) obsahuje 46 bodů, v každém časovém okamžiku jsou zapisovány hodnoty tlaků ze všech bodů, poloha bodu a čas výskytu. Pro určení přesné polohy výskytu tlakových minim byl sledovaný úsek rozdělen na pět intervalů.

Byl testován vliv výskytu tlakových minim v závislosti na hodnotě dynamické viskozity.



Zvolené hodnoty dynamické viskozity : 0,05 [Pa.s]  
 0,10 [Pa.s]  
 0,15 [Pa.s]  
 0,20 [Pa.s]

**Hodnoty sledovaných podtlaků :**

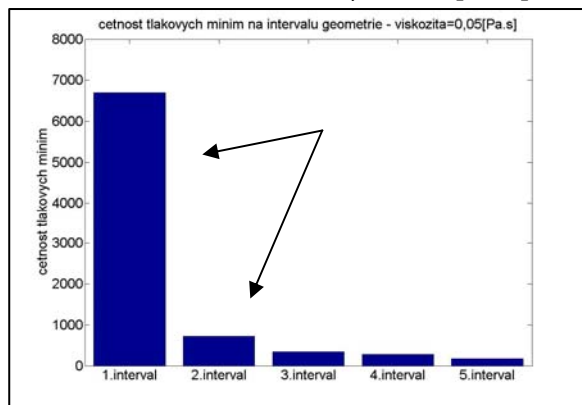
1. interval	0-10MPa	6. interval	50-60MPa
2. interval	10-20MPa	7. interval	60-70MPa
3. interval	20-30MPa	8. interval	70-80MPa
4. interval	30-40MPa	9. interval	80-90MPa
5. interval	40-50MPa	10. interval	90-100MPa

Jsou sledovány pouze hodnoty podtlaků, neboť se předpokládá, že vytrhávání materiálu zubu způsobují extrémně nízké hodnoty tlaků namáhající zub na tah. Extrémně nízké tlaky se objevují s velkou frekvencí výskytu. Hodnoty, které namáhají zub tlakem, nejsou v analýzách uvažovány.

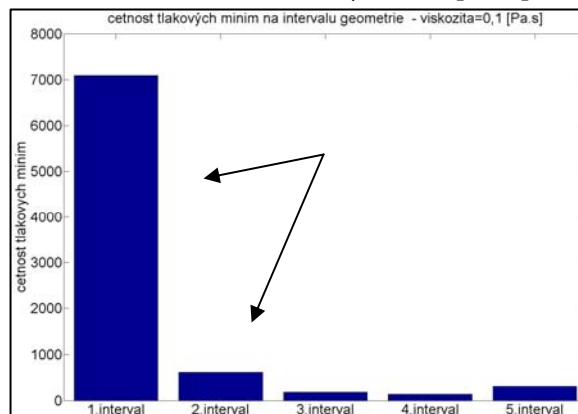
#### a) četnost minim tlaků v závislosti na poloze výskytu

- určení četnosti minima tlaků pro pět intervalů geometrie

Obr.4.17a – četnost tlaků  $\mu = 0,05[\text{Pa.s}]$



Obr.4.17b – četnost tlaků  $\mu = 0,10[\text{Pa.s}]$



Obrázky 4.17a,b zobrazují četnost výskytu lokálních minim tlaku ve zvolených místech geometrie. Největší četnosti minim tlaků jsou v 1. a 2. oblasti geometrie pro všechny hodnoty dynamické viskozity (příloha – Obr.4.17c,d), což je místo, kde dochází k největšímu poškození ozubených kol při provozu.

### Výsledek studie četnosti tlakových minim :

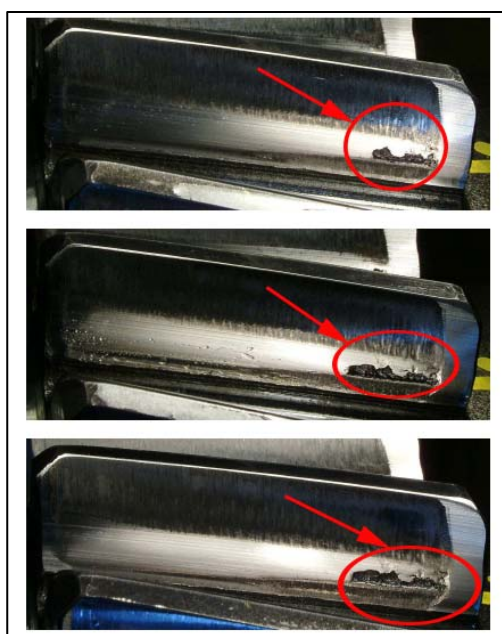
Z předcházejících grafů je patrné, že největší výskyt tlakových minim se nachází v 1. a 2. oblasti geometrie. Vysoká četnost tlakových minim v těchto místech odpovídá i reálnému místu, kde je hnací ozubené kolo nejvíce poškozeno. K největšímu poškození dochází v blízkosti patní kružnice směrem k roztečné kružnici. Výskyt minim v oblasti roztečné kružnice je několikanásobně menší než v blízkosti patní kružnice. Proto k porušení hnacího kola dojde nejdříve v oblasti patní kružnice. Pokud by bylo hnací kolo dále vystaveno podtlakům, zřejmě by bylo také poškozeno v oblasti roztečné kružnice.

*Obr.4.18a – poškození zubů mezi roztečnou a patní kružnicí*



Obrázek 4.18a znázorňuje místo výskytu, kde dochází k největšímu poškození zubu ozubených kol. Místo poškození zubu se shoduje s místem, kde četnosti lokálních minim tlaků jsou největší.

*Obr.4.18b – poškození zubů mezi roztečnou a patní kružnicí*

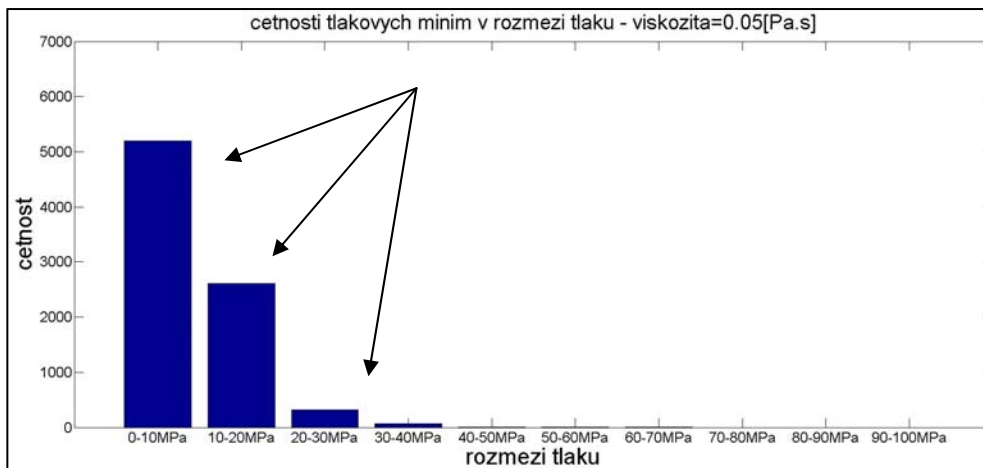


Obrázek 4.18b zobrazuje poškození hnacího ozubeného kola mezi patní a roztečnou kružnicí po 12 hodinách provozu. Místo poškození zubu se shoduje s místy, kde četnosti lokálních minim tlaků dosahují největších četností.

## b) četnost minim tlaků v závislosti na velikosti podtlaků

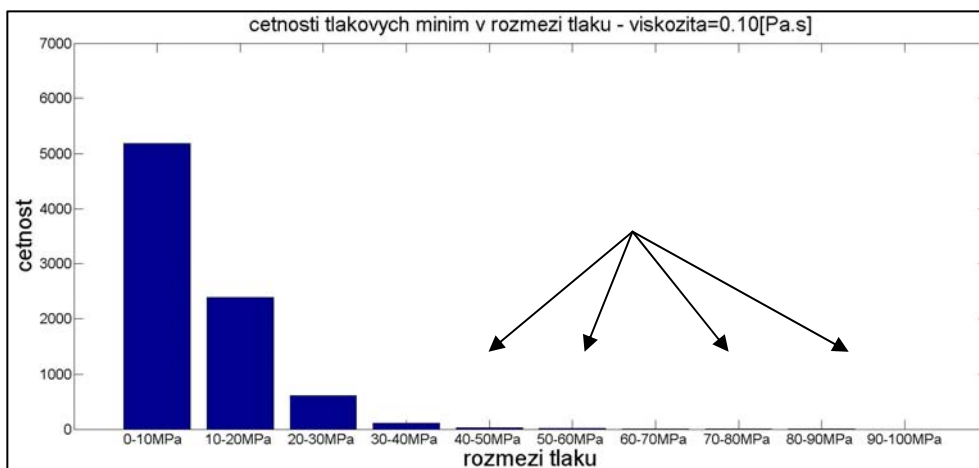
- určení četnosti tlaků pro 10 intervalů velikosti tlaků

Obr.4.19a – četnost tlaků v závislosti na velikosti tlaku  $\mu = 0,05[\text{Pa.s}]$



Obrázek 4.19a zobrazuje četnosti tlakových minim v závislosti na jejich velikosti pro dynamickou viskozitu oleje  $\mu = 0,05[\text{Pa.s}]$ . Z obrázku vyplývá, že podtlaky v rozmezí 0-20MPa mají vysokou četnost výskytu. Extrémně vysoké podtlaky mají četnost mnohonásobně menší.

Obr.4.19b – četnost tlaků v závislosti na velikosti tlaku  $\mu = 0,1[\text{Pa.s}]$



Obrázek 4.19b opět popisuje četnosti tlakových minim, v tomto případě s dynamickou viskozitou oleje  $\mu = 0,1[\text{Pa.s}]$ . Pro tlaky v rozmezí 0-20MPa jsou velikosti četnosti zhruba stejné jako pro dynamickou viskozitu oleje  $\mu = 0,05[\text{Pa.s}]$  (Obr.4.19a) a četnosti vysokých podtlaků jsou opět zanedbatelné.

Při dalších testech dynamické viskozity hodnot  $\mu = 0,15$  a  $0,2[\text{Pa.s}]$  (*příloha – Obr.4.19c,d*) byl výsledek téměř totožný. Z toho lze usoudit, že vliv dynamické viskozity na výskyt četností jednotlivých velikostí podtlaků je zanedbatelný.

Při zaměření na určité tlakové rozmezí jsou vlivy viskozity zřetelné (*příloha – Obr.4.19e-h*). Tyto rozdíly hodnot četností nejsou natolik závažné, aby výrazně ovlivnili předpokládané poškozování povrchu zubu ozubeného kola.

### **Výsledky studie četnosti tlaků dle velikosti :**

Podtlaky v rozmezí hodnot 0-20MPa se vyskytují s vysokou četností. Podtlaky extrémních hodnot se vyskytují s několikanásobně menší četností. Viskozita na četnosti jednotlivých podtlaků nemá vliv.

*Poznámka :* Při četnosti podtlaku 1x za otáčku pastorku dochází k 1 080 000 opakování namáhání zubu za 12 hodin provozu na jeden zub. Povrch zubu je extrémně namáhán opakujícími se podtlaky.

#### 4.4.2 Četnosti lokálního podtlaku v závislosti na šířce zubové mezery

Cílem studie četností tlakových minim v závislosti na šířce zubové mezery je určit vliv velikosti přenášeného kroutícího momentu. Bylo vycházeno z předpokladu, že olejový film má určitou únosnost a k jeho porušení dojde při určitém přiblížení ozubených kol k sobě.

Pokud výskyt minim tlaků bude mít přibližně shodné hodnoty četnosti pro určitou šířku zubové mezery, lze předpokládat, že vliv kroutícího momentu není významný. Četnosti minim tlaků v závislosti na šířce zubové mezery jsou simulovány pro různé hodnoty dynamické viskozity. Z předešlé studie četností tlaků v závislosti na viskozitě se určilo, že k největšímu poškození (výskytu) dochází v 1. a 2. oblasti geometrie zubu, proto v této studii byly vyhodnoceny četnosti tlakových minim pouze pro 1. a 2. oblast zubu.

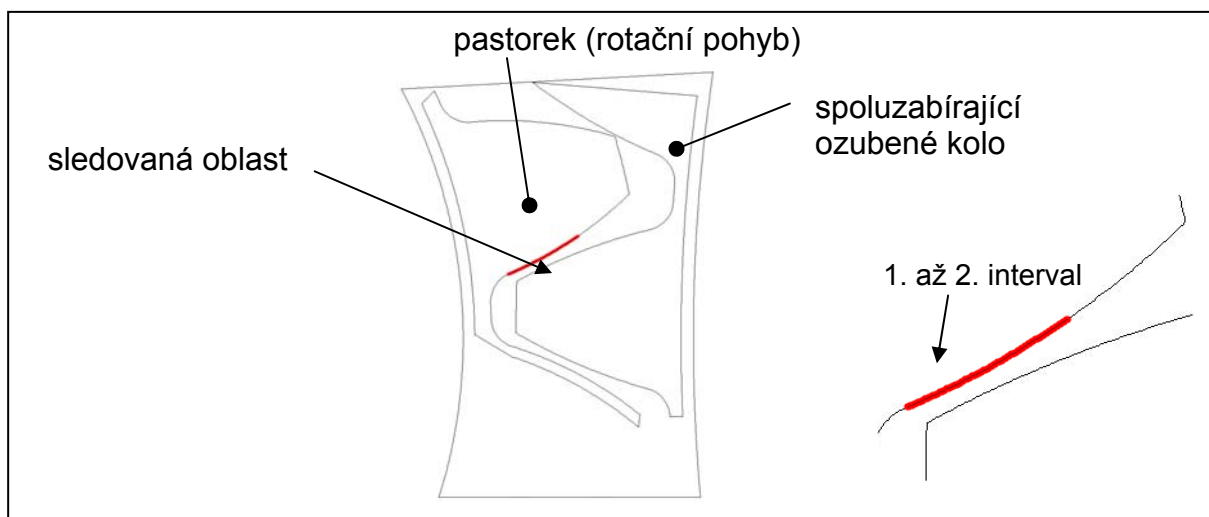
Zvolené hodnoty dynamické viskozity : 0,05 [Pa.s]

0,10 [Pa.s]

0,15 [Pa.s]

0,20 [Pa.s]

*Obr. 4.20 – schéma modelu - znázornění oblasti pro sledování tlakových minim*



Na obrázku 4.20 je znázorněna oblast pro sledování tlakových minim. V tomto případě se studie zaměřila pouze na oblast 1. a 2. , kde jsou četnosti tlakových minim největší.

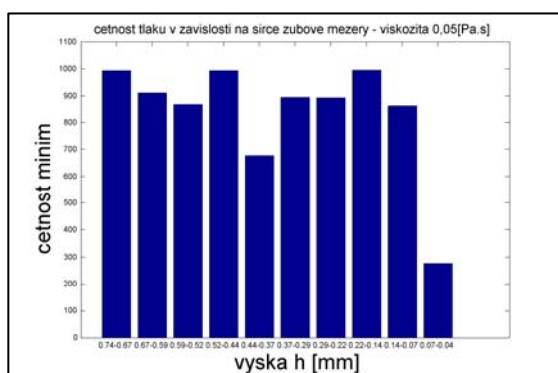
Četnosti minim tlaků byly zaznamenávány v 10-ti intervalech, které odpovídají různým šířkám zubové mezery.

**šířka zubové mezery [mm]**

1. interval	0,74-0,67	2. interval	0,67-0,59
3. interval	0,59-0,52	4. interval	0,52-0,44
5. interval	0,44-0,37	6. interval	0,37-0,29
7. interval	0,29-0,22	8. interval	0,22-0,14
9. interval	0,14-0,07	10. interval	0,07-0,04

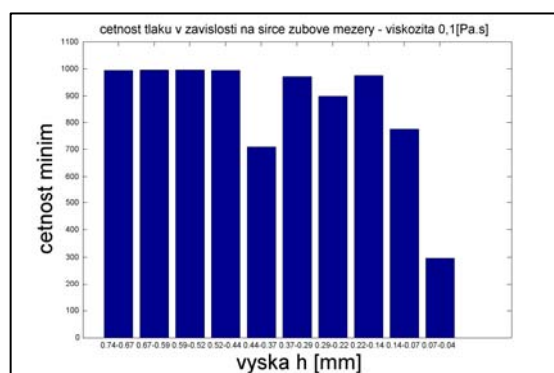
Obr.4.21a – četnost minim tlaku

$\mu = 0,05[\text{Pa.s}]$



Obr.4.21b – četnost minim tlaků

$\mu = 0,10[\text{Pa.s}]$



Na obrázcích 4.21a,b jsou zobrazeny četnosti tlakových minim v závislosti na velikosti zubové mezery pro dynamické viskozity  $\mu = 0,05$  a  $0,1[\text{Pa.s}]$ . Pro další testy s hodnotami dynamické viskozity  $0,15$  a  $0,2[\text{Pa.s}]$  (příloha – Obr.4.21c,d) bylo zjištěno, že četnosti tlakových minim se výrazně neliší pro uvažované přiblížení ozubených kol při různých dynamických viskozitách.

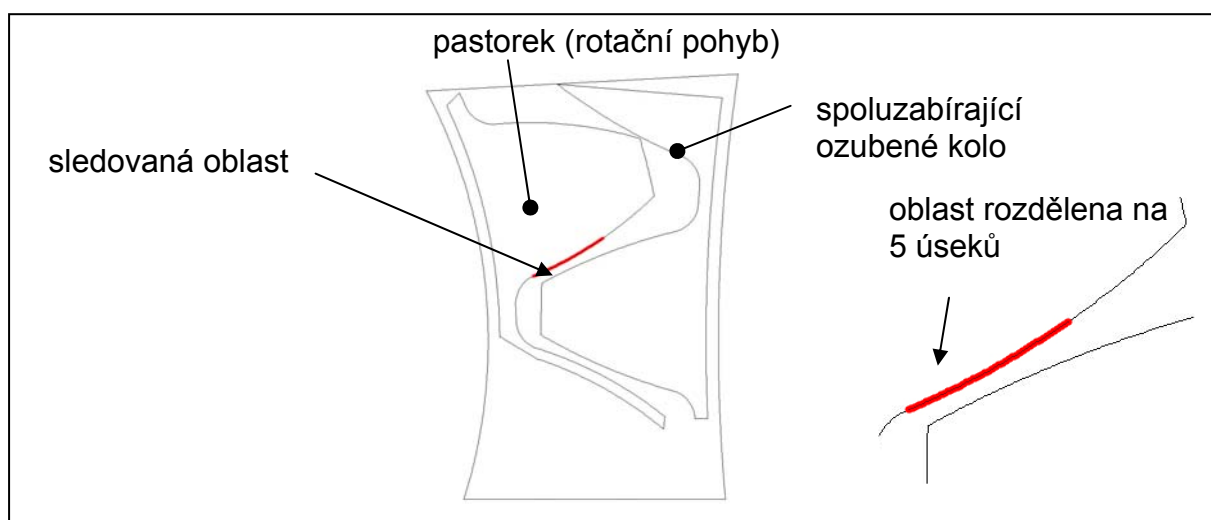
### Výsledky studie četnosti tlakových minim v závislosti na šířce zubové mezery :

Výskyt podtlaků na uvažované geometrii ozubených kol není závislý na velikosti přenášeného kroutícího momentu.

#### 4.4.3 Četnosti lokálního podtlaku v závislosti na velikosti otáček pastorku

Cílem studie bylo sledování četnosti lokálních podtlaků v závislosti na otáčkách ozubeného kola. Při získání závislosti mezi velikostí otáček a četnostmi podtlaků by bylo možné stanovit optimální otáčky hnacího kola a tím předejít nebo oddálit poškození ozubení. Pro numerické simulace byly použity otáčky blízké skutečným provozním podmínkám. Hodnota dynamické viskozity byla pro všechny simulace stejná, měnily se pouze otáčky pastorku.

Obr. 4.22 – schéma modelu - znázornění oblasti pro sledování tlakových minim



Sledovaná oblast (Obr. 4.22) obsahuje 46 bodů, v každém časovém okamžiku jsou zapisovány hodnoty tlaků ze všech bodů, poloha bodu a čas výskytu. Pro určení přesné polohy výskytu tlakových minim byl sledovaný úsek rozdělen na pět intervalů.

Hodnoty otáček, které byly použity simulaci :

otáčky pastorku ot./min.
<b>1300</b>
<b>1500</b>
<b>1700</b>
<b>1900</b>

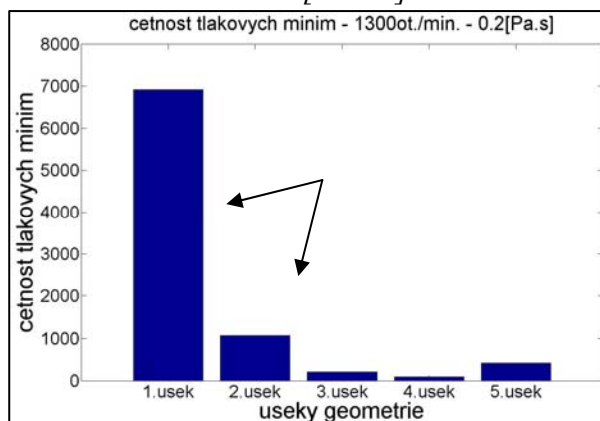
Opět jsou sledovány pouze podtlaky, které by mohly způsobovat vytrhávání materiálu z ozubených kol. Při různé rychlosti otáčení pastorku se mění počet záběrů ozubených kol za jednotku času, aby bylo možné výsledky porovnávat, byly vztaženy na jednotkový časový úsek.

### a) četnost minim tlaků v závislosti na poloze výskytu

- určení místa výskytu minim tlaků pro pět intervalů geometrie

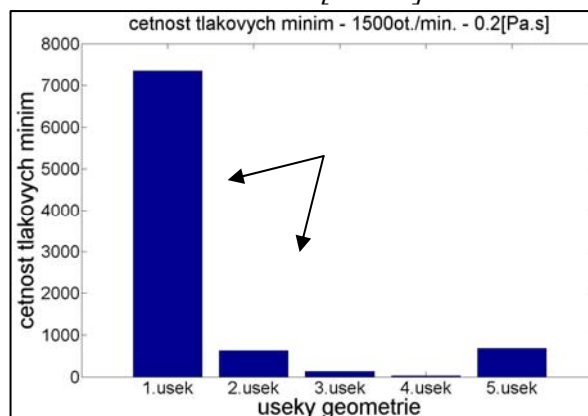
Obr.4.23a – četnost tlaků

$n = 1300[\text{ot/min}]$



Obr.4.23b – četnost tlaků

$n = 1500[\text{ot/min}]$



Obrázek 4.23a,b popisuje výskyt tlakových minim na uvažované geometrii v závislosti na otáčkách pastorku. Pro velikosti otáček  $n = 1300$  a  $1500[\text{ot/min}]$  jsou četnosti tlaků největší v 1. a 2. intervalu sledované geometrie. Pro otáčky  $n = 1700$  a  $1900[\text{ot/min}]$  jsou četnosti tlakových minim největší opět v 1. a 2. oblasti geometrie (příloha – Obr.4.23c,d).

### Výsledky studie četnosti podtlaků v závislosti na místě výskytu :

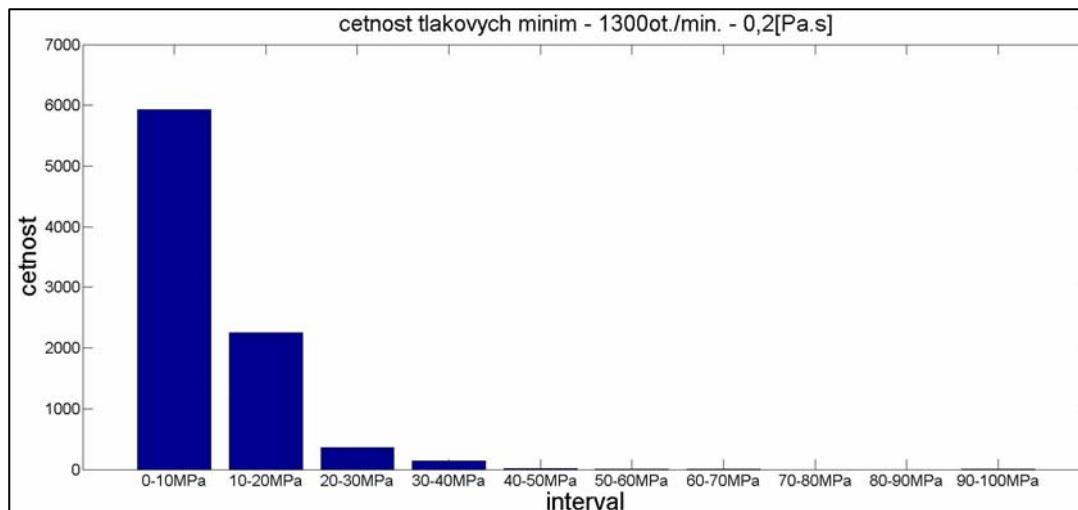
Výskyt celkové četnosti podtlaků téměř nezávisí na velikosti otáček hnacího kola. Největší četnosti podtlaků se nachází v 1. a 2. oblasti geometrie pro všechny volené otáčky hnacího kola, to odpovídá místu s největším poškozením zubu ozubeného kola.



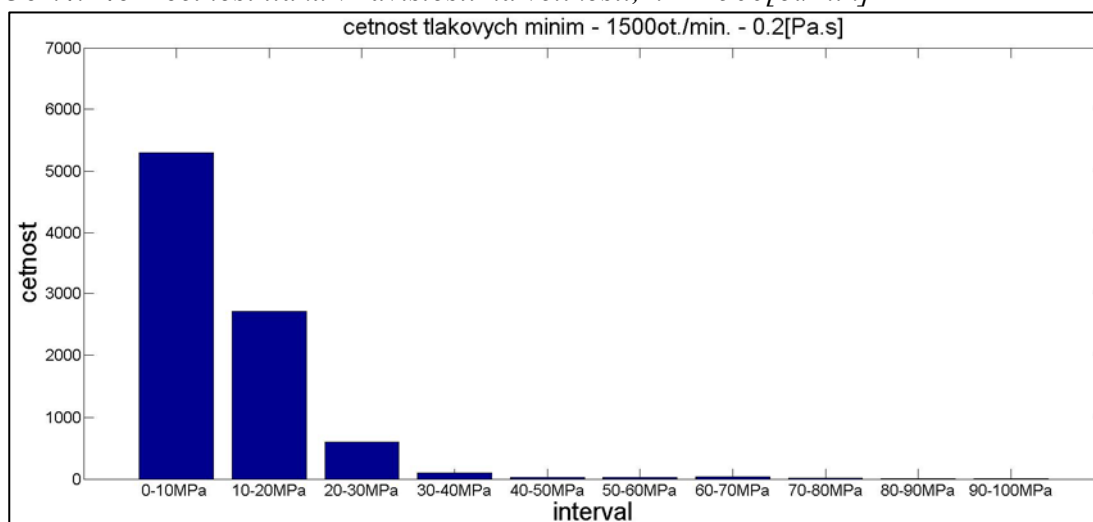
## b) četnost minim tlaků v závislosti na velikosti podtlaků

- určení četnosti tlaků pro 10 intervalů velikosti tlaků

Obr.4.24a – četnost tlaků v závislosti na velikosti,  $n = 1300[\text{ot/min}]$



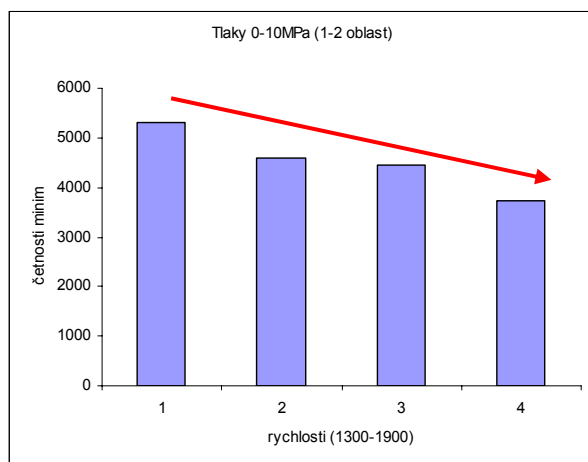
Obr.4.24b – četnost tlaků v závislosti na velikosti,  $n = 1500[\text{ot/min}]$



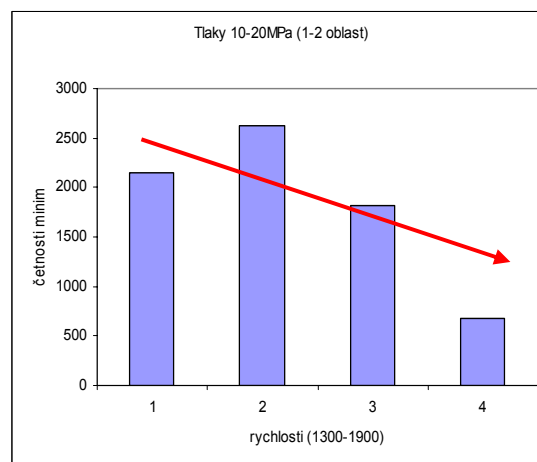
Obrázek 4.24a,b zobrazuje četnosti tlakových minim v závislosti na jejich velikosti pro velikost otáček  $n = 1300$  a  $1500[\text{ot/min}]$ . Podtlaky nízkých hodnot (0-20MPa) jsou zastoupeny velkými četnostmi a podtlaky vysokých hodnot (30-100MPa) jsou zastoupeny malými četnostmi pro uvažované rychlosti otáčení pastorku  $n = 1300[\text{ot/min}]$  (Obr.4.24a),  $n = 1500[\text{ot/min}]$  (Obr.4.24b),  $n = 1700[\text{ot/min}]$  (příloha - Obr.4.24c),  $n = 1900[\text{ot/min}]$  (příloha - Obr.4.24d).

**c) četnost minim tlaků v 1. a 2. oblasti geometrie pro jednotlivé tlakové rozmezí**

*Obr.4.25a – četnosti podtlaků 0-10MPa*



*Obr.4.25b – četnosti podtlaků 10-20MPa*

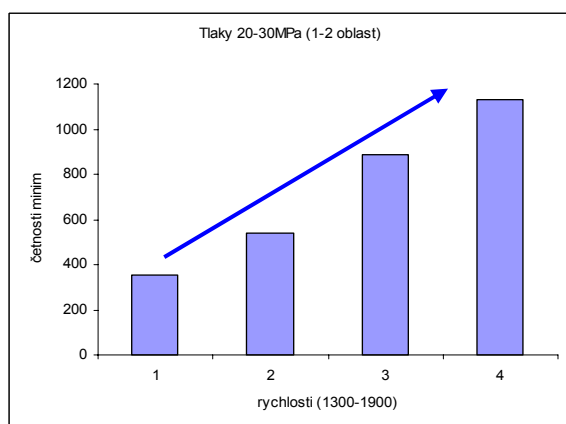


*Poznámka :*

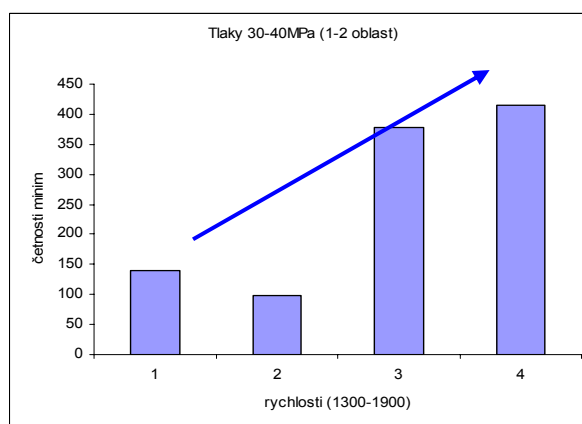
*osa x : 1 → n = 1300[ot/min]; 2 → n = 1500[ot/min]; 3 → n = 1700[ot/min]; 4 → n = 1900[ot/min]*

Obrázky 4.25a,b zobrazují četnosti tlakových minim pro hodnoty podtlaku 0-20MPa v závislosti na velikosti otáček pastorku. Z obrázku je patrná klesající tendence četnosti tlaků (červená šipka) s rostoucím počtem otáček pro tlakové rozmezí 0-20MPa na 1. a 2. intervalu geometrie.

*Obr.4.26a – četnosti podtlaků 20-30MPa*



*Obr.4.26b – četnosti podtlaků 30-40MPa*



Obrázky 4.26a,b zobrazují četnosti tlakových minim pro hodnoty podtlaku 20-40MPa v závislosti na velikosti otáček pastorku. Z obrázku je patrná rostoucí tendence četnosti tlaků

(modrá šipka) s rostoucím počtem otáček pro tlakové rozmezí 20-40MPa na 1. a 2. intervalu geometrie. Tato tendence platí i pro tlakové rozmezí 40-60MPa (*příloha - Obr.4.26c,d*).

Podrobný souhrn četností pro jednotlivé rychlosti otáčení pastorku je uveden v příloze (*příloha – Tab.č.13*).

### **Výsledky studie vlivu otáček na četnost minim tlaků**

Změna otáček nemá zásadní vliv na celkové četnosti podtlaků v uvažovaných oblastech geometrie hnaného kola.

Bez ohledu na velikost otáčení hnaného kola se vyskytují největší četnosti podtlaků v 1. a 2. oblasti geometrie. Počet četnosti vysokých (30-100MPa) podtlaků je mnohonásobně menší než výskyt podtlaků menších (0-30MPa).

S rostoucí velikostí otáček mírně klesá četnost malých podtlaků (0-20MPa), ale výrazně roste četnost velkých podtlaků (20-60MPa)

#### 4.4.4 Četnosti lokálního podtlaku v závislosti na typu geometrie

V této části práce byl zkoumán vliv geometrie na výskyt lokálních podtlaků podél geometrie boku zubu. Na základě údajů o ozubeném soukolí od firmy Wikov a.s. byly vytvořeny tři typy geometrie, u kterých se použily pouze jiné hodnoty korekcí ozubených převodů (Tab.č.13). Na těchto třech typech geometrie byla testována četnost tlakových minim při použití stejných parametrů ozubeného soukolí.

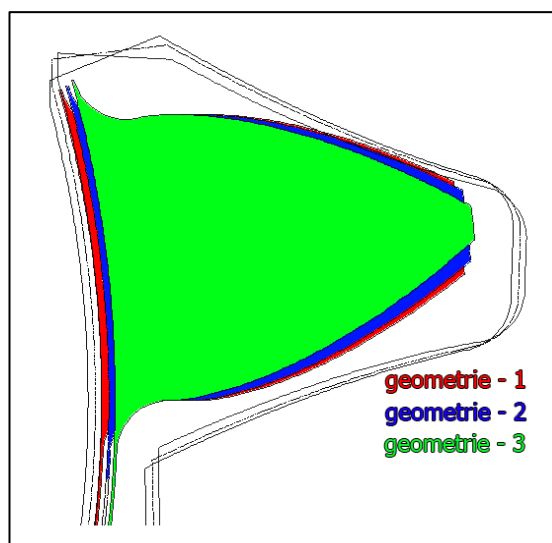
Tabulka č.14

<b>geometrie I.</b>	<b>geometrie II.</b>	<b>geometrie III.</b>
<i>korekce - 1</i>	<i>korekce - 2</i>	<i>korekce - 3</i>
X1 = 0,1	X1 = 0,2	X1 = 0,3664
X2 = -0,0184	X2 = -0,1183	X2 = -0,2847

Provozní parametry ozubeného soukolí :  $n = 1500$  [ot./min], dynamická viskozita oleje  $\mu = 0,2$  [Pa.s]

Způsob sledování tlakových minim byl stejný jako v předcházející kapitole (viz 4.4.3).

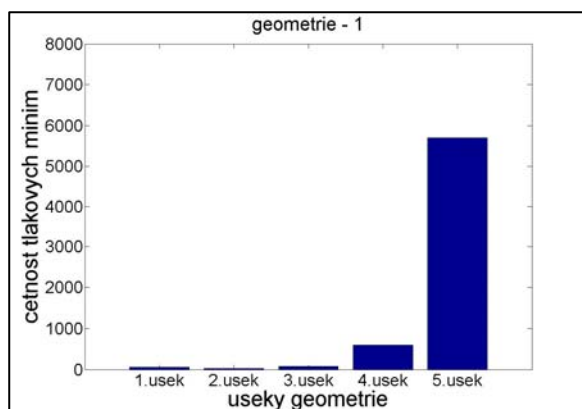
Obr.4.27 – zobrazení rozdílů mezi uvažovanými variantami geometrie



### a) četnost minim tlaků v závislosti na poloze výskytu

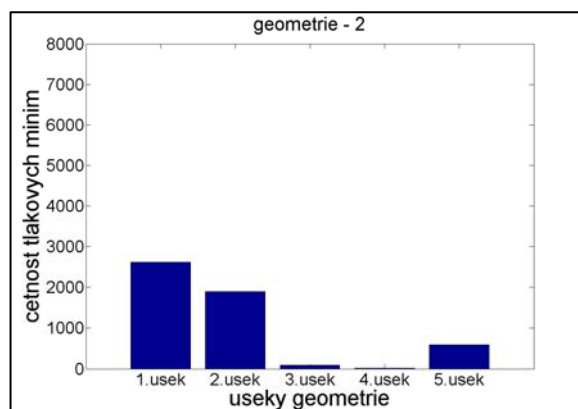
Obr.4.28a – četnost podtlaků

geometrie – I.

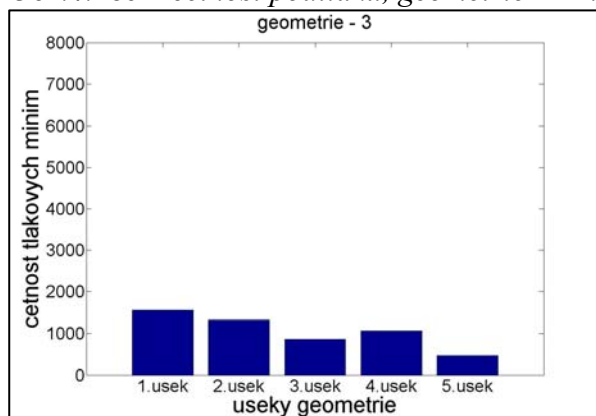


Obr.4.28b – četnost podtlaků

geometrie –II.



Obr.4.28c – četnost podtlaků, geometrie – III.



Obrázky 4.28 zobrazují četnosti výskytu tlakových minim na uvažovaných částech geometrie zubu. Obrázek 4.28a ukazuje, že četnosti tlakových minim jsou největší v 4. a 5. sledované oblasti. Při simulaci s použitím geometrie II. se největší četnosti tlakových minim přesunuly do 1. a 2. úseku zubu (Obr.4.28b). Na obrázku 4.28c jsou zobrazeny četnosti tlakových minim pro geometrie III. Zde jsou četnosti tlakových minim rovnoměrně rozloženy mezi všechny uvažované úseky na části zubu (Obr.4.28c). Hodnoty četností tlakových minim v závislosti na velikosti podtlaku a místě výskytu jsou uvedeny v tabulce č.15

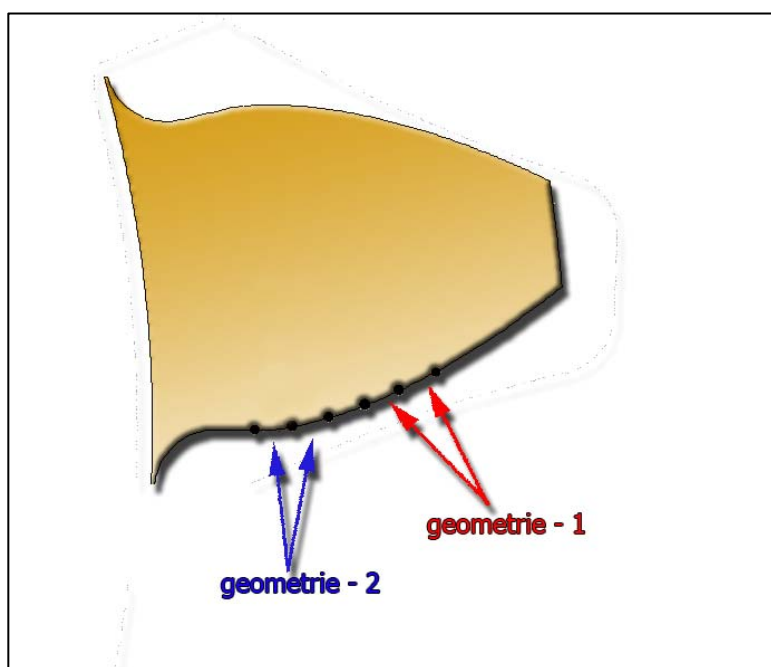
### Výsledky studie četnosti podtlaků v závislosti na místě výskytu :

Tento test ukazuje, že vliv typu geometrie na tvorbu lokálních podtlaků je obrovský. Geometrie ze všech provedených testů nejvýrazněji ovlivňuje výskyt tlakových minim a to jak v místě výskytu, tak velikosti četnosti.

### b) četnost minim tlaků v závislosti na velikosti podtlaků

Při testování výskytu četnosti tlakových minim se opět ukázal výrazný vliv tvaru geometrie zubu. Pro typ geometrie I. byly četnosti podtlaků největší. U geometrie II. byl zaznamenán mírný pokles četností a u geometrie III. byly hodnoty četností podtlaků nejmenší (příloha - Obr.4.29a,b,c).

*Obr. 4.30 – úseky s největším počtem četností podtlaku*



Obr.4.30 ukazuje, kde jsou největší četnosti podtlaků pro testované geometrie. Geometrie III. není na obrázku znázorněna, neboť její rozložení tlakových minim je rovnoměrné podél sledované oblasti zubu ozubeného kola.

**Výsledky studie četnosti podtlaků v závislosti na místě výskytu :**

Opět je potvrzen významný vliv tvaru geometrie zubu na četnosti a velikosti podtlaků na povrchu zubu.

## 5. Zhodnocení dosažených výsledků práce a závěr

Práce ukazuje, že ke sledování nestacionárních dějů v zubové mezeře lze použít numerické simulace. Tato práce byla zaměřena na sledování jevů, které by mohly způsobovat poškození ozubených převodů při provozu. Středem zájmů byly lokální podtlaky v oleji v oblasti zubové mezery. Tento přístup k problému poškození ozubených kol je zcela nový a ukazuje na komplexnost problému, neboť do řešení vstupuje celá řada parametrů, jako je tvar geometrie, vlastnosti oleje, otáčky ozubeného soukolí a teplota oleje. Je možno sledovat změny výskytu četnosti tlakových minim vlivem těchto parametrů a určit, zda bude docházet k poškození ozubeného soukolí, popřípadě na jakém místě geometrie zubu.

Problém poškození ozubených kol byl nejprve řešen na zjednodušeném modelu částí ozubených kol, kde byla uvažována pouze přímočará rychlost zubu ozubeného kola. Tento přístup ověřil ideu, že k poškození ozubených kol pravděpodobně dochází výskytem extrémně nízkých hodnot tlaku. Tato práce také ukázala možnosti numerické simulace při sledování způsobu mazání ozubených kol na složitějším dvoufázovém modelu.

Na zjednodušený případ ozubených kol navazuje práce, která zkoumala výskyt extrémních hodnot tlaku na přesnější geometrii soukolí, která více odpovídala skutečnosti. Cílem této části bylo ověření výskytu tlakových minim pro různé velikosti výpočetní sítě a pro různé časové kroky. Dále byl testován vliv dynamické viskozity na výskyt tlakových minim při záběru ozubených kol k sobě.

V další části práce byl zkoumán výskyt tlakových minim na složitější geometrie a byly vytvořeny postupy pro vyhodnocování četnosti tlakových minim. Výskyt extrémních hodnot tlaků byl sledován v závislosti na různých parametrech ozubeného soukolí a vlastnostech oleje. Sledováním těchto závislostí bylo umožněno určit, které parametry při provozu ozubeného soukolí mají významný vliv na tvorbu tlakových minim a možné následné poškození ozubených kol.

Test hodnot dynamické viskozity na četnost tlakových minim ukázal, že viskozita oleje nemá výrazný vliv na tvorbu lokálních podtlaků. To znamená, že při různých provozních stavech ozubených převodů, jako je počátek provozu, kdy je teplota oleje nízká nebo při delším

provozu, kdy je olej značně zahřátý a bude mít jiné vlastnosti než v klidovém stavu, bude výskyt podtlaků přibližně stejný a k poškozování ozubených převodů bude docházet i nadále.

Vliv přenášeného kroutícího momentu byl testován pro různé hodnoty dynamické viskozity. Četnosti tlakových minim v závislosti na šířce zubové mezery byly po celou dobu průběhu přibližování ozubených kol k sobě přibližně vyrovnány. S ohledem k tomuto jevu, který se projevoval stejně i pro jiné hodnoty dynamické viskozity, lze říci, že vliv přenášeného kroutícího momentu na výskyt tlakových minim a následné poškození ozubených kol nebyl zjištěn.

V závěrečné části práce se zkoumal vliv velikosti otáček ozubeného kola na četnost tlakových minim. Byly testovány čtyři hodnoty otáček pastorku a bylo zjištěno, že otáčky neovlivňují místo výskytu extrémních tlaků. Byla však zjištěna tendence, kdy při zvyšování otáček ozubeného kola klesají četnosti výskytu hodnot nízkých tlaku a rostou četnosti výskytu vysokých hodnot podtlaků.

Jako poslední se provedly testy geometrie na vliv tvorby extrémních podtlaků. Použitím různých hodnot korekcí pro ozubená kola byly vytvořeny tři typy geometrie, které byly testovány. Vliv geometrie se ukázal jako nejvýraznější činitel pro tvorbu podtlaků. Nalezením vhodné geometrie při dodržení předepsaných konstrukčních rozměrů by se dalo předejít, nebo alespoň oddálit poškození povrchu zubu vlivem vytrhávání materiálu ze zubu ozubeného kola.

Všechny výše uvedené testy byly provedeny na 2D modelu částí ozubených kol. Budoucí studii tvorby podtlaků při záběru ozubených kol by šlo rozšířit o uvažování 3D problému, neizotermního proudění v zubové mezeře, závislosti dynamické viskozity na tlaku a teplotě. Vhodné by bylo ověřit výsledky numerických simulací s experimentem a pokračovat ve velmi dobré spolupráci s firmou Wikov MGI a.s. a konzultovat dosažené výsledky s jejich zkušenostmi.



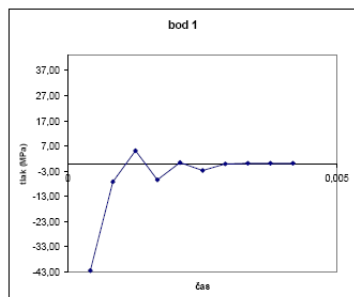
### Seznam literatury :

- [1] J.H.Ferziger and M. Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer Verlag, 1999
- [2] David C. Wilcox: Basic Fluid Mechanics, DCW Industries, 2003
- [3] Fluent News, <http://www.fluent.co.uk>
- [4] Ch. E. Brennen, Fundamentals of Multiphase Flow, Cambridge University Press, New York, 2005
- [5] D. L. Youngs, Time-Dependent Multi-Material Flow with Large Fluid Distortion. In K. W. Morton and M. J. Baines, editors, *Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Academic Press, 1982.
- [6] František Lemfeld, Karel Fraňa, Jiří Unger, Numerical Simulations of Unsteady Oil Flows in the Gear-boxes, Journal of Applied Science in Thermodynamics and Fluid mechanics (JASTFM), issue 1, 2007, **ISSN 1802-9388**, <http://astfm.tul.cz>
- [7] Fluent 6.2 Documentation
- [8] Gambit 2.2 Documentation
- [9] Převodové skříně: [http://www.setra-gear.cz/cmd\\_france\\_er\\_master.html](http://www.setra-gear.cz/cmd_france_er_master.html)
- [10] Lubomír Pešík, Části strojů, Technická univerzita v Liberci, 2005
- [11] Technická dokumentace, výkresy, Wikov MGI a.s., 2008

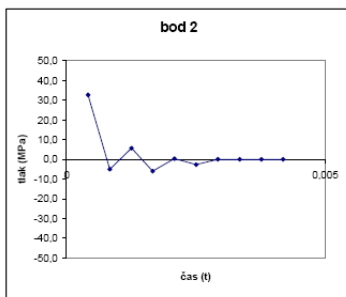
## Přílohy :

### Obr.4.2a-k – zobrazení průběhu tlaku ve zvolených bodech geometrie

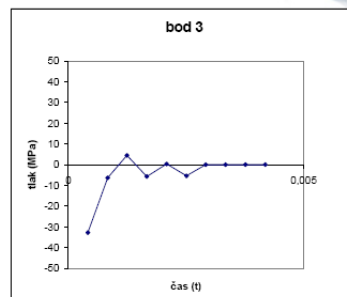
Obr.4.2a – bod 1



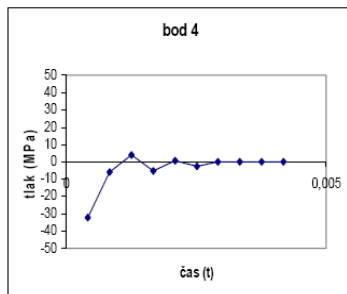
Obr.4.2b – bod 2



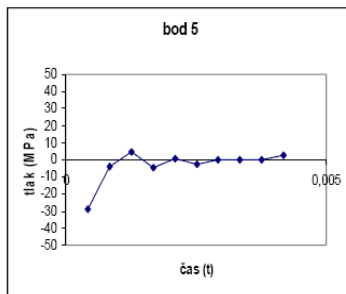
Obr.4.2c – bod 3



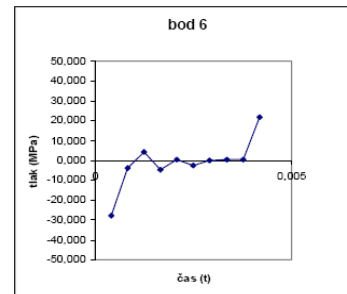
Obr.4.2d – bod 4



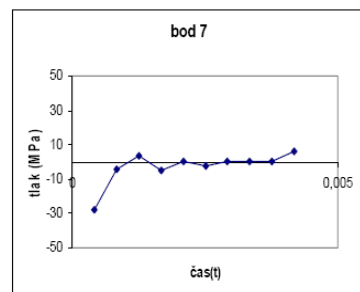
Obr.4.2e – bod 5



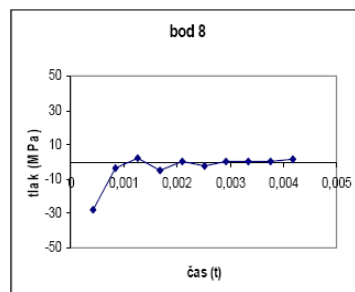
Obr.4.2f – bod 6



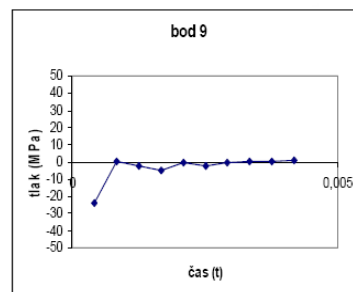
Obr.4.2g – bod 7



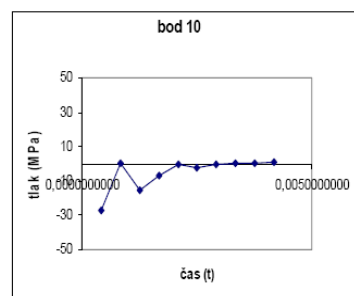
Obr.4.2h – bod 8



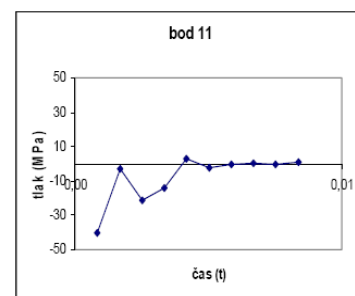
Obr.4.2i – bod 9



Obr.4.2j – bod 10

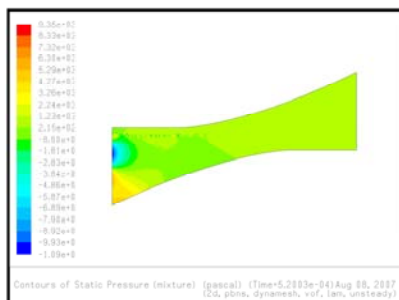


Obr.4.2k – bod 11

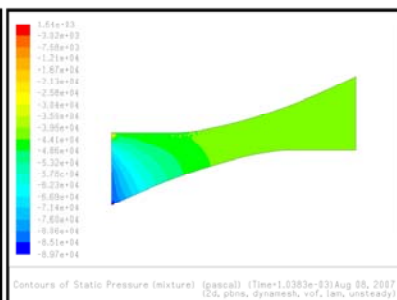


## Obr.4.4a-j – tlakové pole ve sledovaných časových intervalech

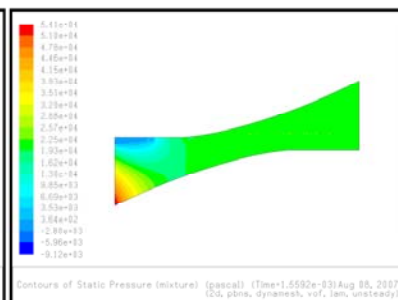
Obr.4.4a –  $t = 5,2e-4s$



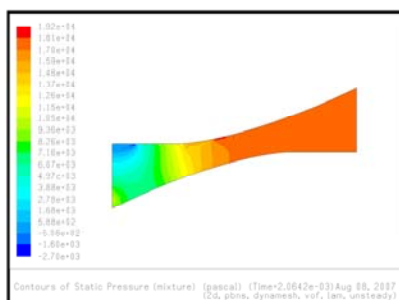
Obr.4.4b –  $t = 1,038e-3s$



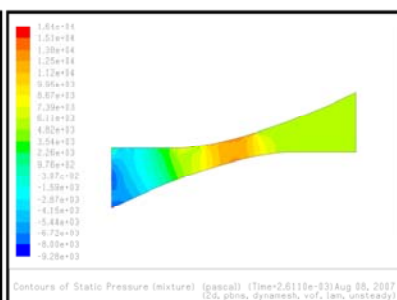
Obr.4.4c –  $t = 1,559e-3s$



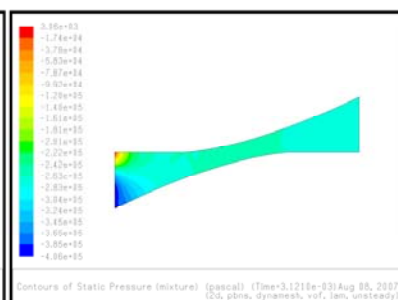
Obr.4.4d –  $t = 2,064e-3s$



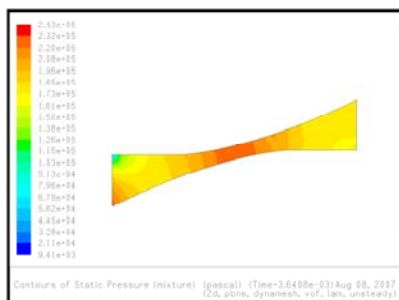
Obr.4.4e –  $t = 2,611e-3s$



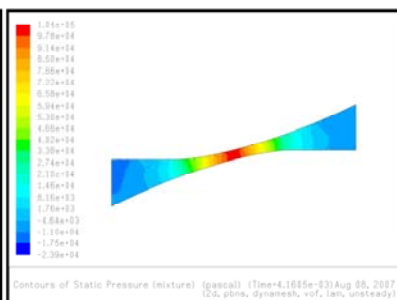
Obr.4.4f –  $t = 3,121e-3s$



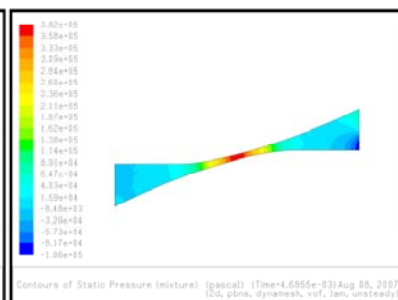
Obr.4.4g –  $t = 3,64e-3s$



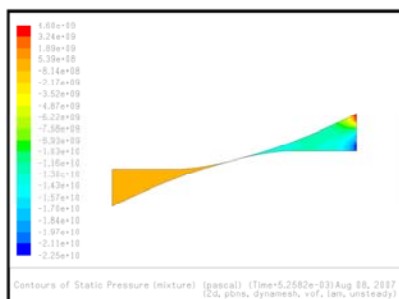
Obr.4.4h –  $t = 4,16e-3s$



Obr.4.4i –  $t = 4,685e-3s$



Obr.4.4j – čas  $t = 5,258e-3s$

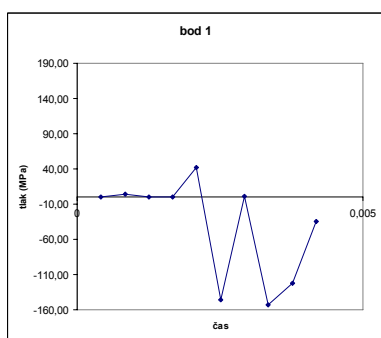


Tabulka č.10 – hodnoty tlaků v jednotlivých bodech pro sledované časové intervaly

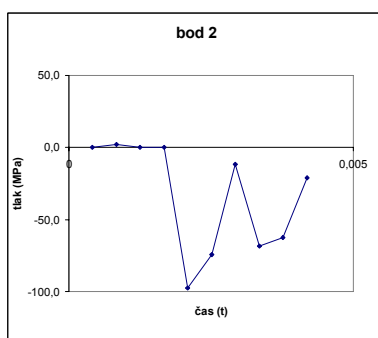
	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	b10	b11
1	-0,03	-0,01	-0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
2	4,55	2,23	1	-5,68	-4,23	-0,11	-0,15	-0,16	-0,15	-0,09	0,25
3	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
4	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
5	42,1	-97,5	-242,28	-404,64	-607,67	-867,73	-1056,3	-1094,67	-1099,62	-1098,77	-1086,48
6	-145,46	-74,22	-80,15	-96,76	-123,99	-158,27	-190,59	-205,93	-209,78	-211,89	-223,74
7	1,56	-11,48	-22,5	-38,76	-65,23	-96,77	-126,91	-142,72	-149,24	-152,4	-158,49
8	-152,78	-68,49	-73,69	-95,14	-127,24	-170,97	-209,08	-229,71	-237	-235,67	-241,55
9	-122,04	-62,32	-79,4	-116,39	-172,65	-275,77	-346,13	-381,96	-399,24	-407,27	-435,13
10	-34,58	-21,23	2,28	58,59	74,32	-13036,4	-13144,6	-12884,7	-12822,8	-13504,3	-17575,8

Obr.4.5a-j – časový průběh tlaků v jednotlivých bodech

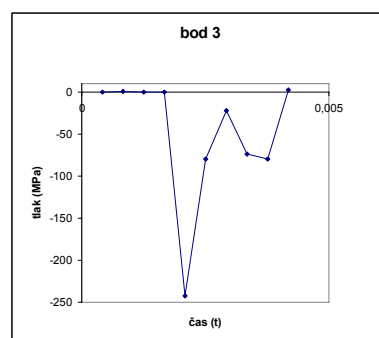
Obr.4.5a – bod 1



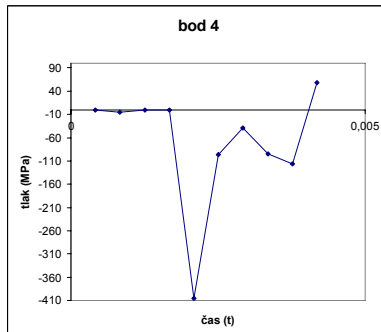
Obr.4.5b – bod 2



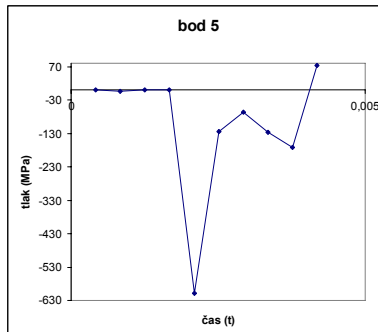
Obr.4.5c – bod 3



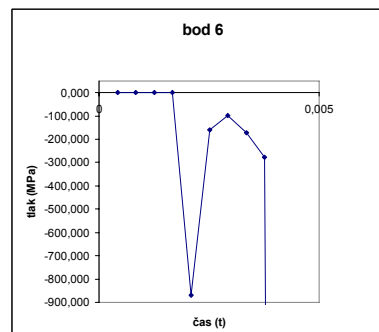
Obr.4.5d – bod 4



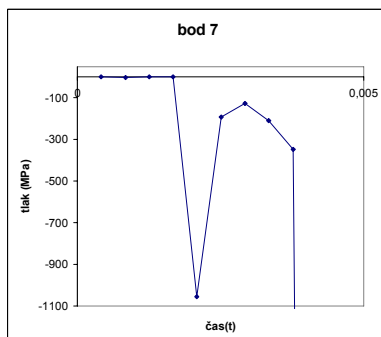
Obr.4.5e – bod 5



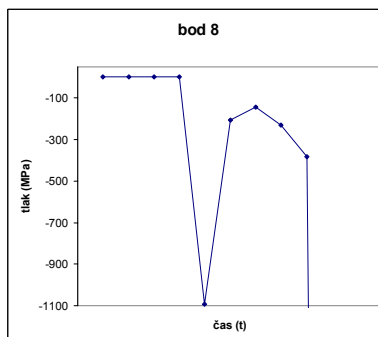
Obr.4.5f – bod 6



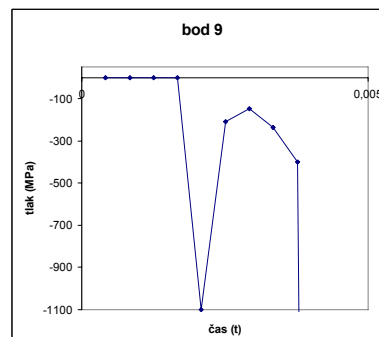
Obr.4.5g – bod 7



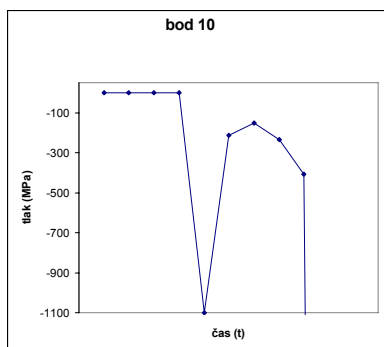
Obr.4.5h – bod 8



Obr.4.5i – bod 9

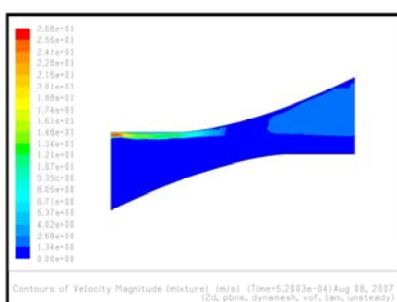


*Obr.4.5i – bod 10*

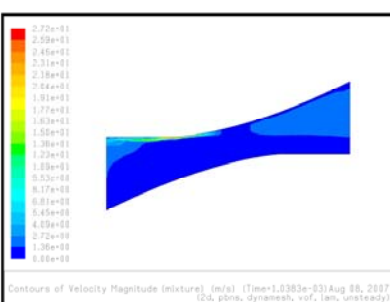


*Obr.4.6a-j – rychlostní pole ve sledovaných časových intervalech*

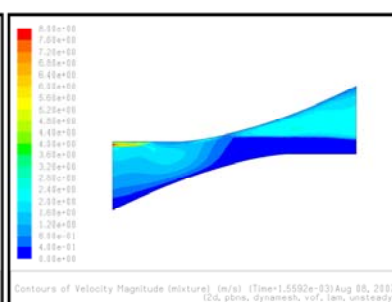
*Obr.4.6a –  $t = 5,2e-4$ s*



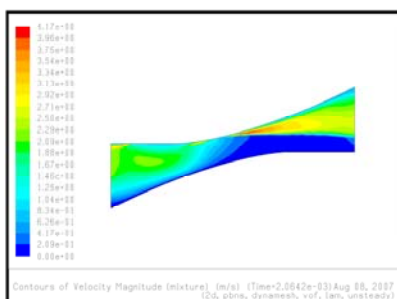
*Obr.4.6b –  $t = 1,038e-3$ s*



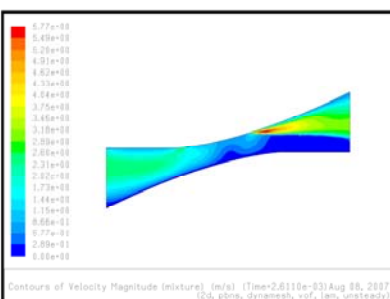
*Obr.4.6c –  $t = 1,559e-3$ s*



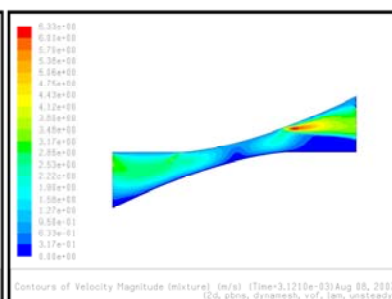
*Obr.4.6d –  $t = 2,064e-3$ s*



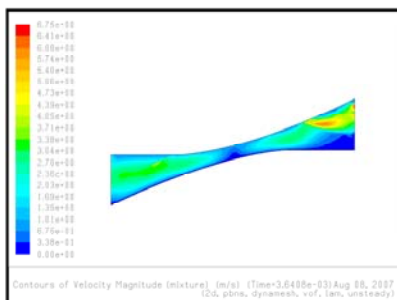
*Obr.4.6e –  $t = 2,611e-3$ s*



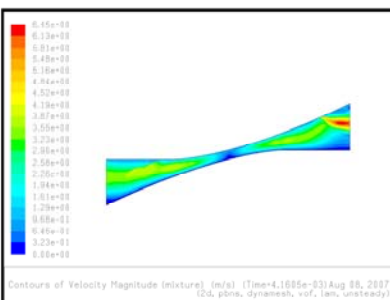
*Obr.4.6f –  $t = 3,121e-3$ s*



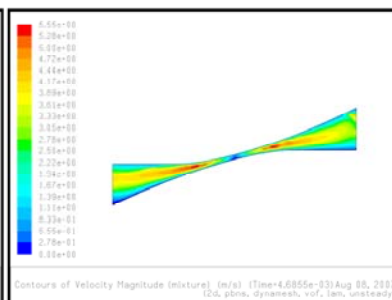
*Obr.4.6g –  $t = 3,64e-3$ s*



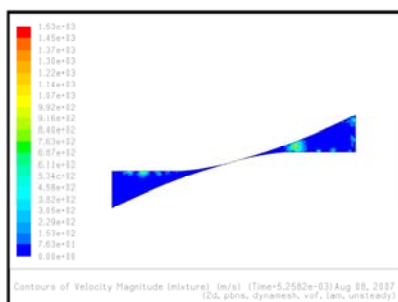
*Obr.4.6h –  $t = 4,16e-3$ s*



*Obr.4.6i –  $t = 4,685e-3$ s*

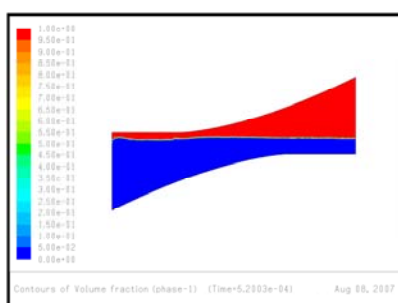


**Obr.4.6j –  $t = 5,258e-3s$**

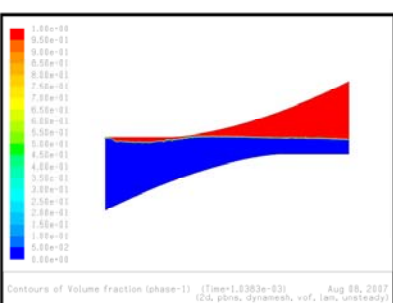


**Obr.4.7a-j – rozložení „olej – vzduch“ ve sledovaných časových intervalech**

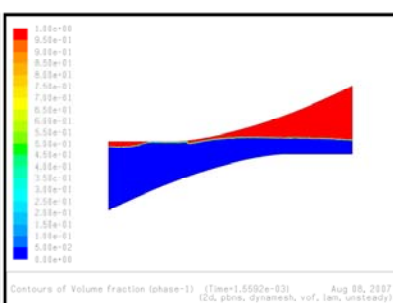
**Obr.4.7a –  $t = 5,2e-4s$**



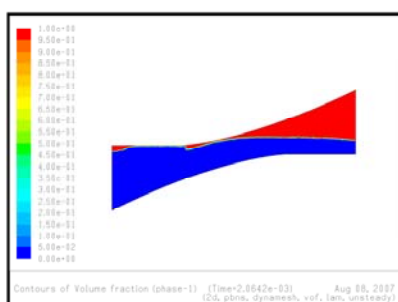
**Obr.4.7b –  $t = 1,038e-3s$**



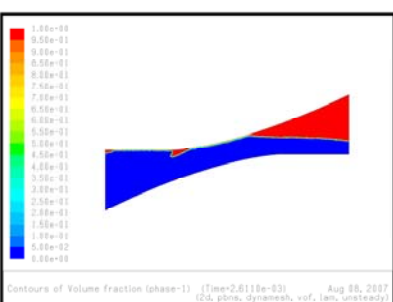
**Obr.4.7c –  $t = 1,559e-3s$**



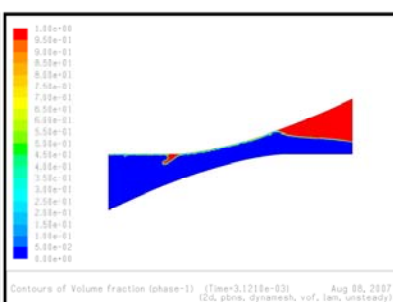
**Obr.4.7d –  $t = 2,064e-3s$**



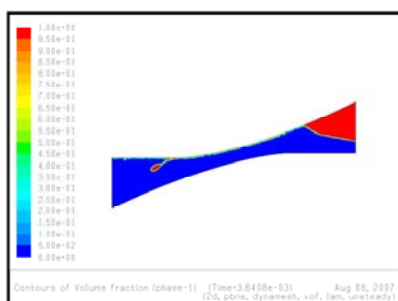
**Obr.4.7e –  $t = 2,611e-3s$**



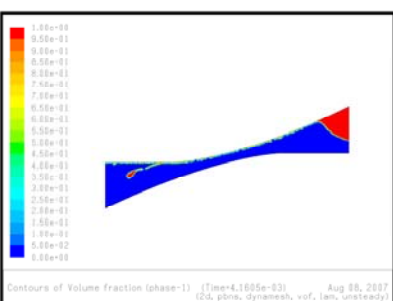
**Obr.4.7f –  $t = 3,121e-3s$**



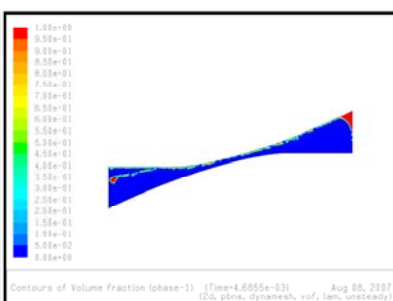
**Obr.4.7g –  $t = 3,64e-3s$**



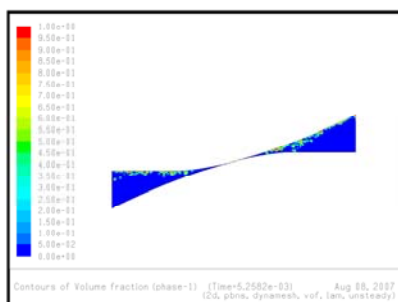
**Obr.4.7h –  $t = 4,16e-3s$**



**Obr.4.7i –  $t = 4,685e-3s$**

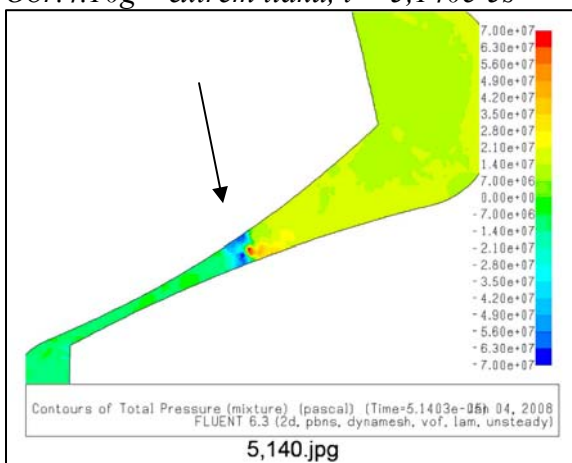


Obr.4.7j –  $t = 5,258e-3s$

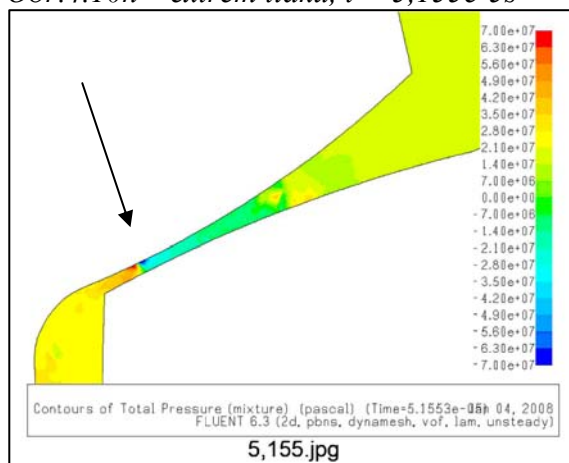


Obr.4.10 – různá místa výskytu tlakových extrémů

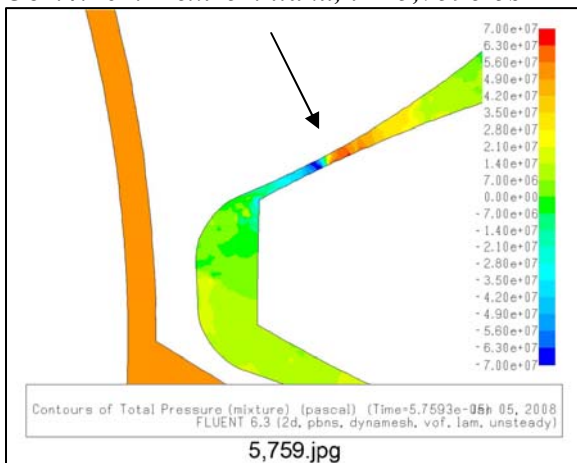
Obr.4.10g – extrém tlaku,  $t = 5,140e-5s$



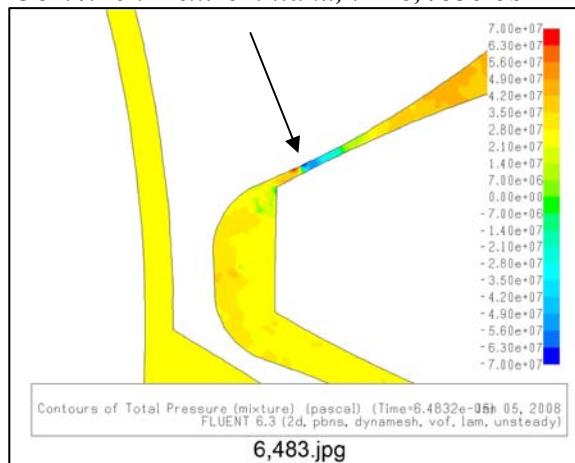
Obr.4.10h – extrém tlaku,  $t = 5,155e-5s$



Obr.4.10m – extrém tlaku,  $t = 5,759e-5s$

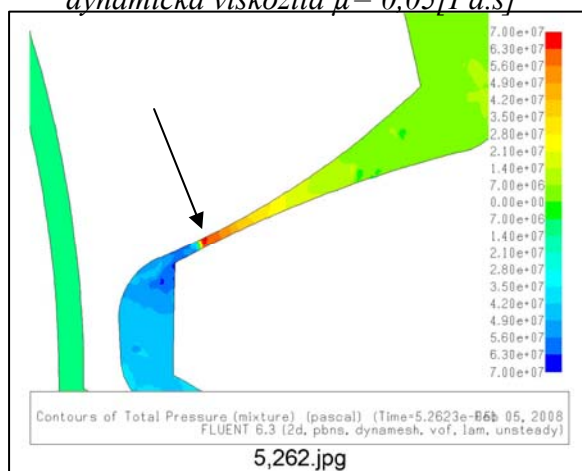


Obr.4.10n – extrém tlaku,  $t = 6,483e-5s$

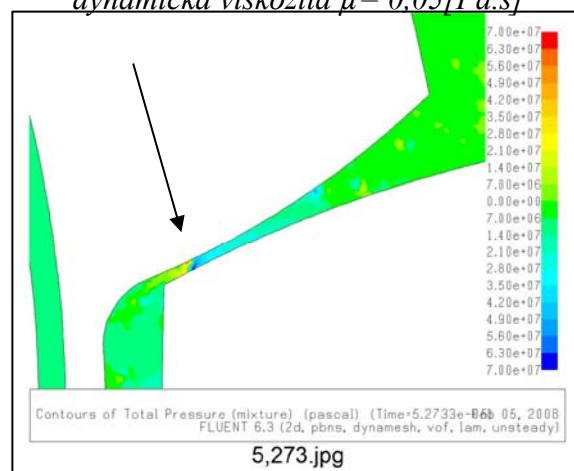


**Obr.4.11 – 4.14 – tlakové extrémy pro různé hodnoty dynamické viskozity**

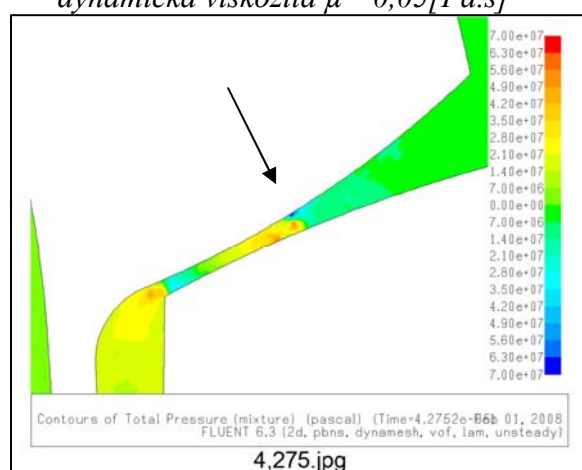
**Obr.4.11a – extrém tlaku,  $t = 5,262e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,05[Pa.s]$**



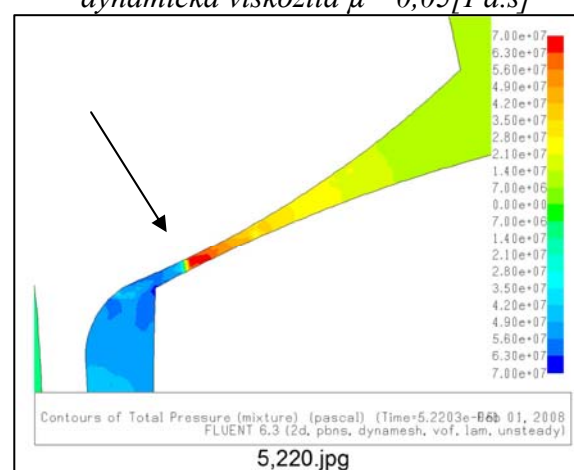
**Obr.4.11b – extrém tlaku,  $t = 6,483e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,05[Pa.s]$**



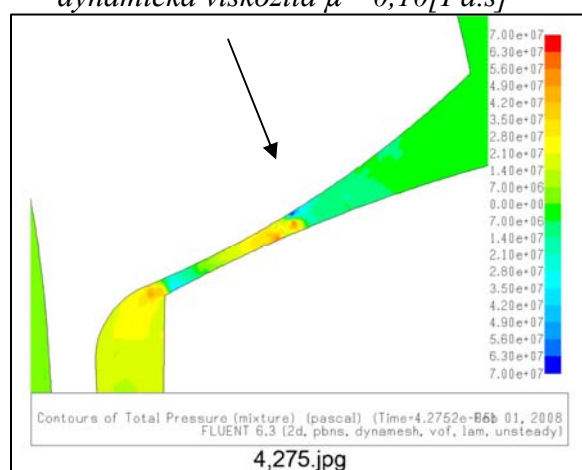
**Obr.4.11c – extrém tlaku,  $t = 4,275e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,05[Pa.s]$**



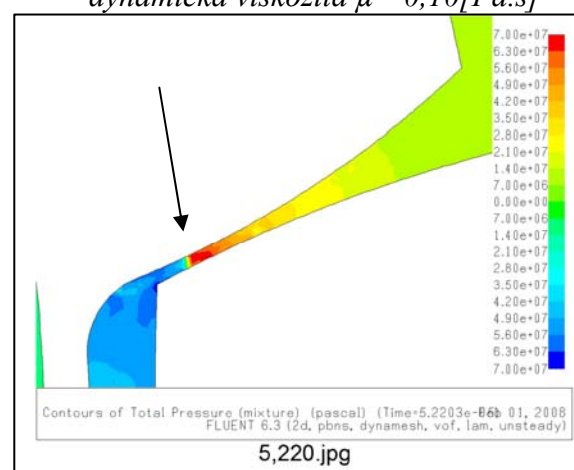
**Obr.4.11d – extrém tlaku,  $t = 5,220e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,05[Pa.s]$**



**Obr.4.12a – extrém tlaku,  $t = 4,275e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,10[Pa.s]$**

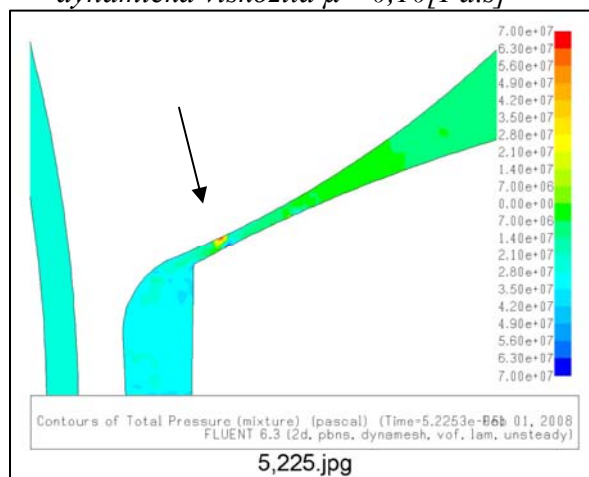


**Obr.4.12b – extrém tlaku,  $t = 5,220e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,10[Pa.s]$**

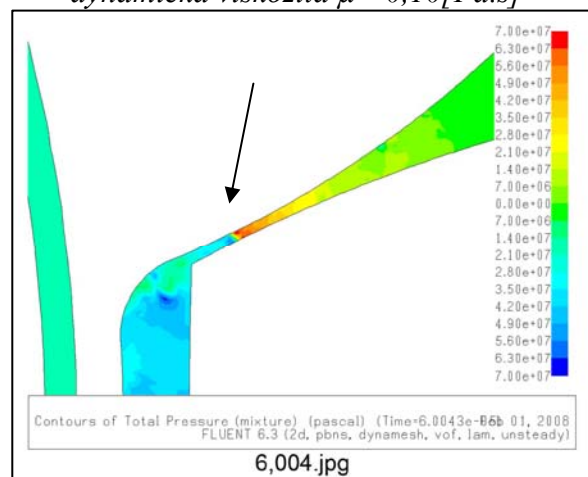




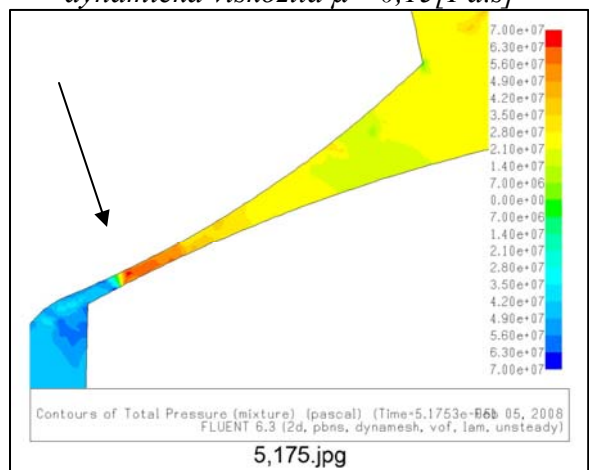
Obr.4.12c – extrém tlaku,  $t = 5,225e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,10[Pa.s]$



Obr.4.12d – extrém tlaku,  $t = 6,004e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,10[Pa.s]$



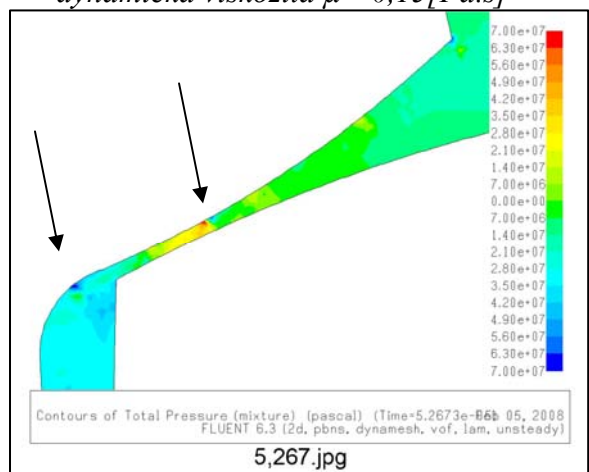
Obr.4.13a – extrém tlaku,  $t = 5,175e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,15[Pa.s]$



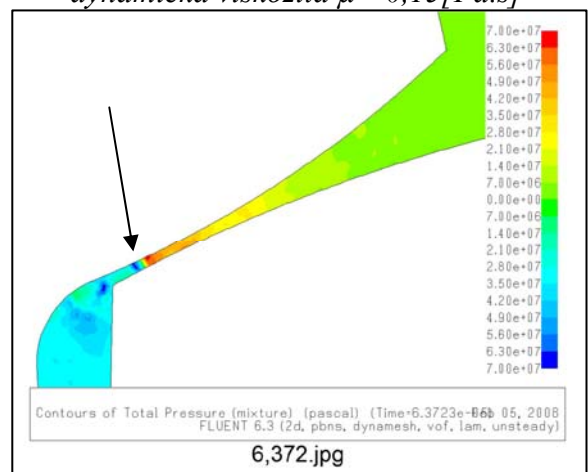
Obr.4.13b – extrém tlaku,  $t = 5,225e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,15[Pa.s]$



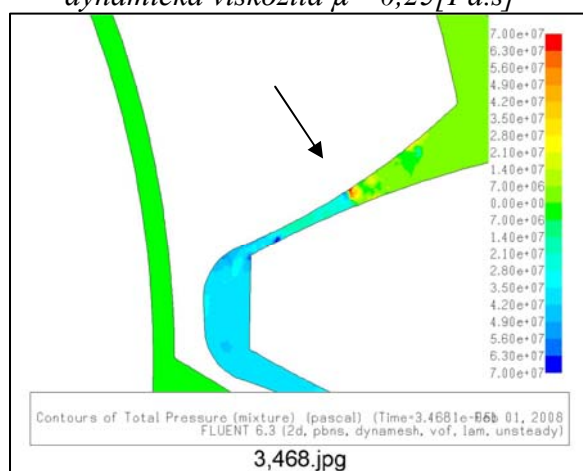
Obr.4.13c – extrém tlaku,  $t = 5,267e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,15[Pa.s]$



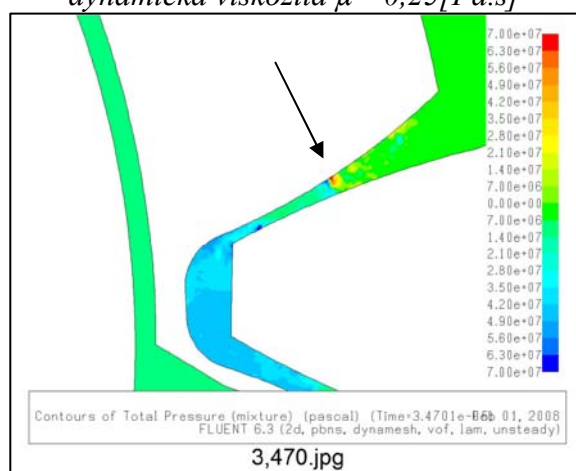
Obr.4.13d – extrém tlaku,  $t = 6,372e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,15[Pa.s]$



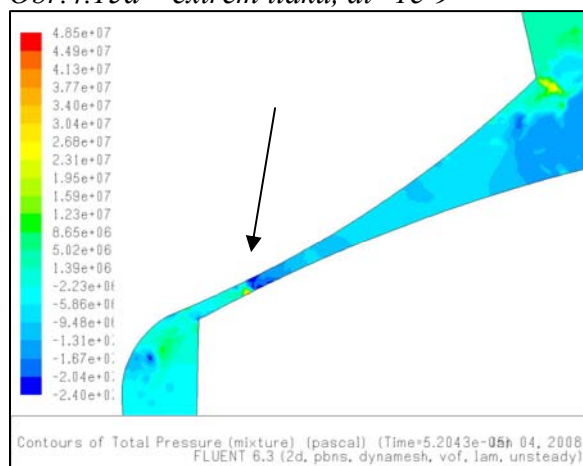
Obr.4.14a – extrém tlaku,  $t = 5,267e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,25[Pa.s]$



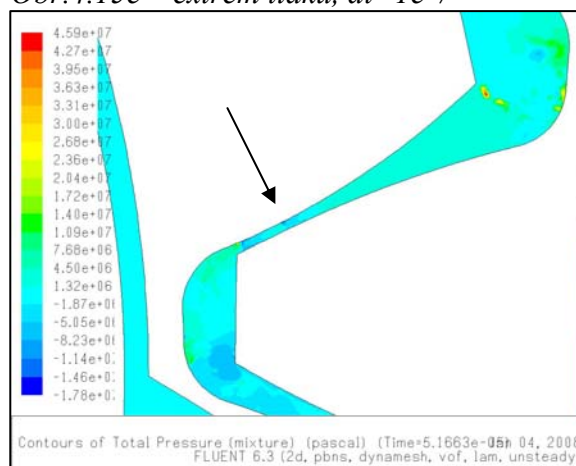
Obr.4.14b – extrém tlaku,  $t = 6,372e-5s$   
dynamická viskozita  $\mu = 0,25[Pa.s]$



Obr.4.15d – extrém tlaku,  $dt=1e-9$

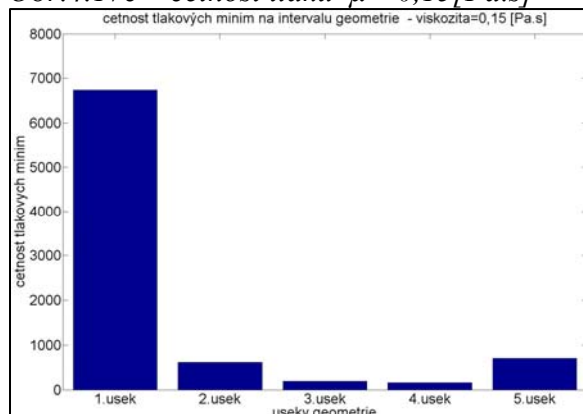


Obr.4.15e – extrém tlaku,  $dt=1e-7$

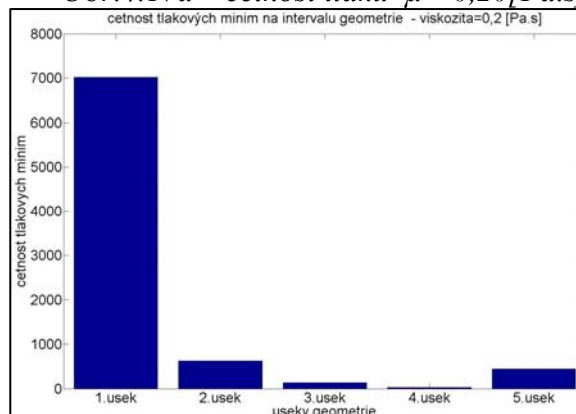


Obr.4.17 - četnost minim tlaků v závislosti na poloze výskytu - různé hodnoty dynamické viskozity

Obr.4.17c – četnost tlaků  $\mu = 0,15[Pa.s]$

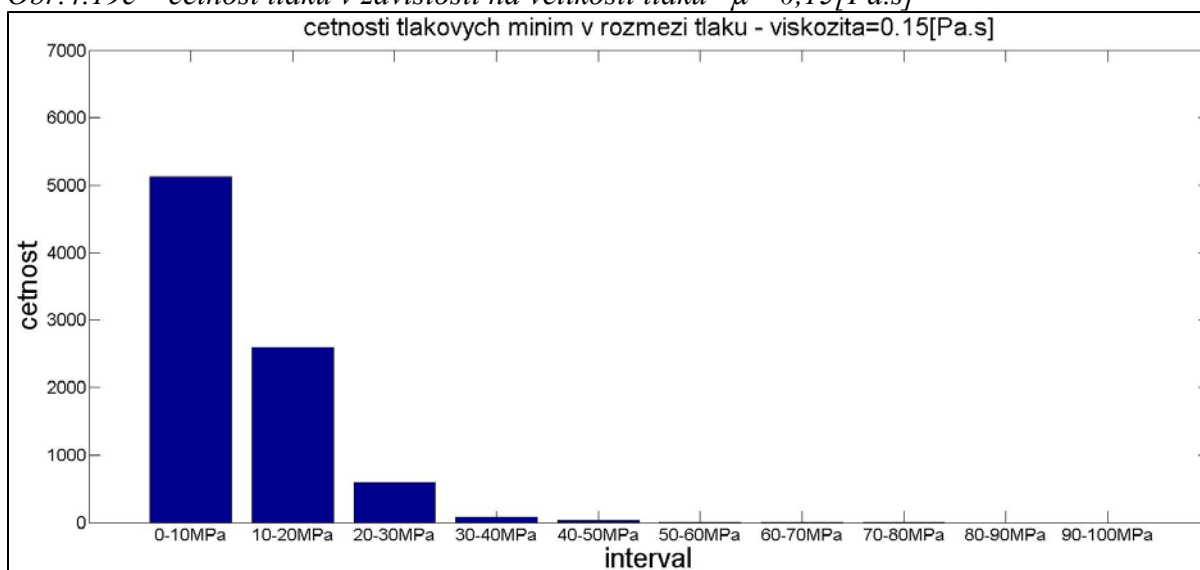


Obr.4.17d – četnost tlaků  $\mu = 0,20[Pa.s]$

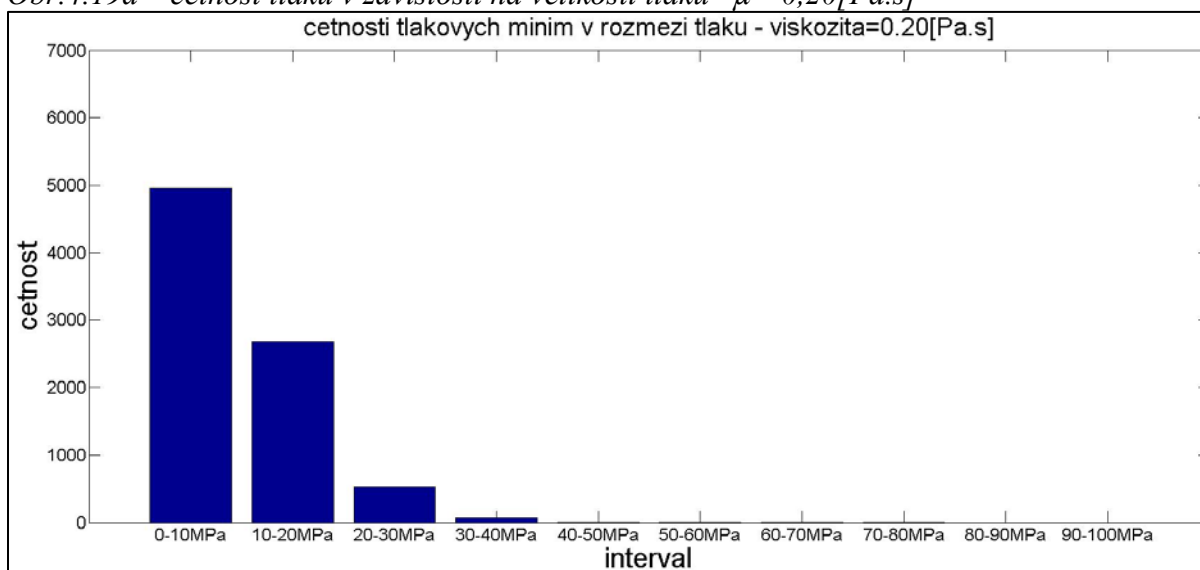


**Obr.4.19 - četnost minim tlaků v závislosti na velikosti podtlaků- různé hodnoty dynamické viskozity**

**Obr.4.19c – četnost tlaků v závislosti na velikosti tlaku  $\mu = 0,15[\text{Pa.s}]$**

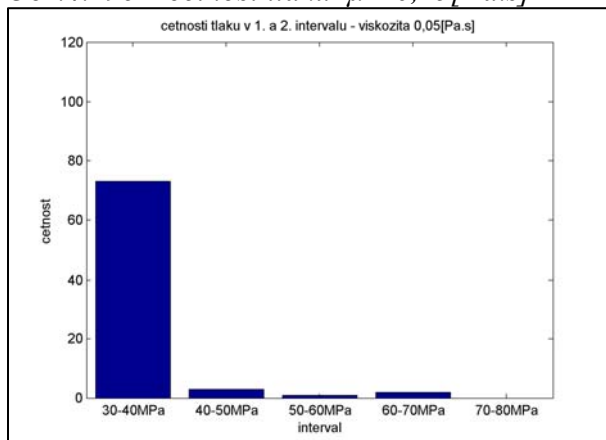


**Obr.4.19d – četnost tlaků v závislosti na velikosti tlaku  $\mu = 0,20[\text{Pa.s}]$**

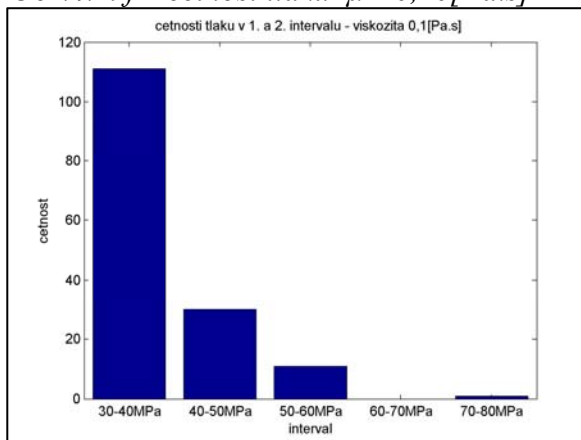


**Obr.4.19 - četnosti podtlaků v 1. a 2. intervalu v rozmezí hodnot 30-80MPa – různé hodnoty dynamické viskozity**

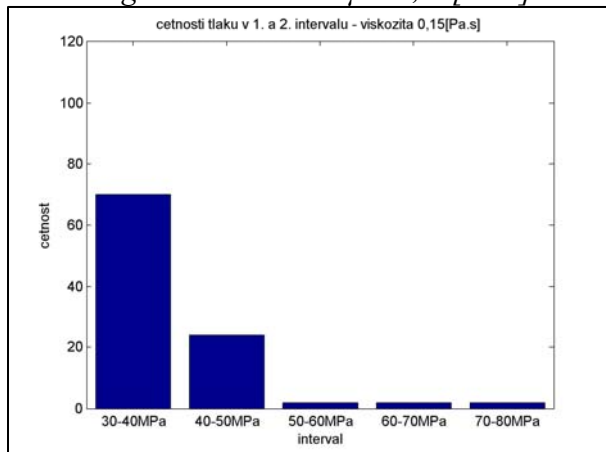
**Obr.4.19e – četnost tlaků  $\mu = 0,15[\text{Pa.s}]$**



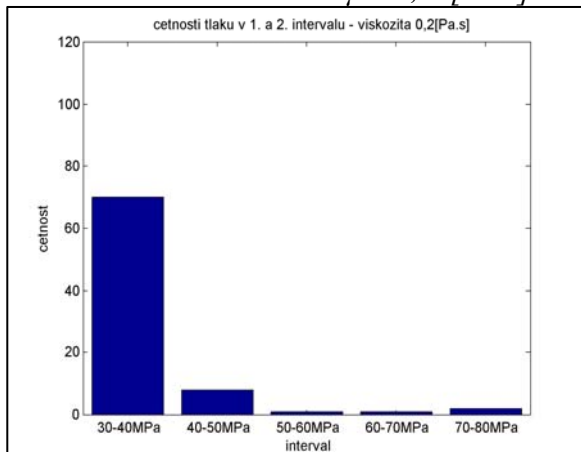
**Obr.4.19f – četnost tlaků  $\mu = 0,20[\text{Pa.s}]$**



**Obr.4.19g – četnost tlaků  $\mu = 0,15[\text{Pa.s}]$**

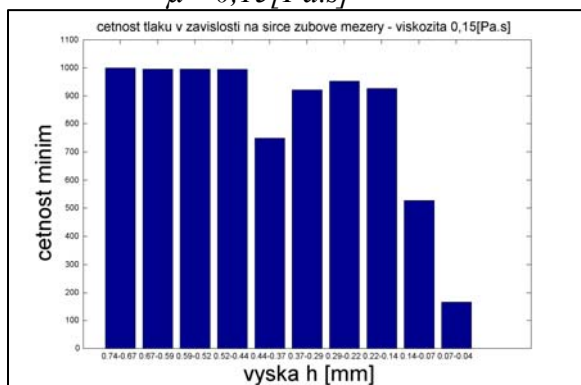


**Obr.4.19h – četnost tlaků  $\mu = 0,20[\text{Pa.s}]$**

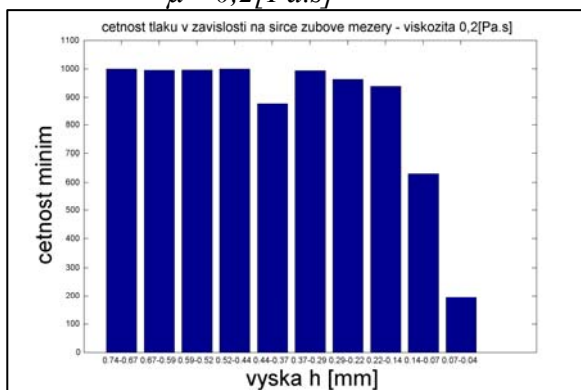


**Obr.4.21 - četnosti talkových minim v závislosti na šířce zubové mezery- různé hodnoty dynamické viskozity**

**Obr.4.21c – četnost minim tlaku  $\mu = 0,15[\text{Pa.s}]$**

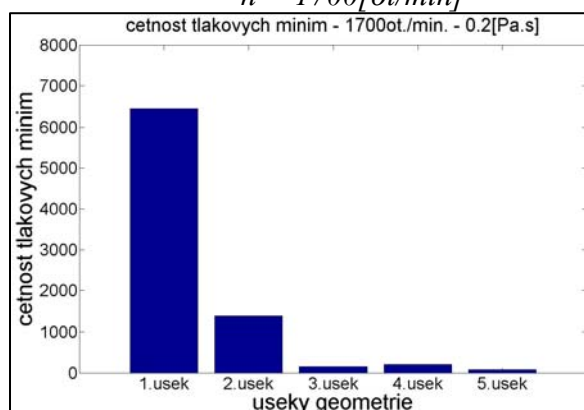


**Obr.4.21d – četnost minim tlaků  $\mu = 0,2[\text{Pa.s}]$**

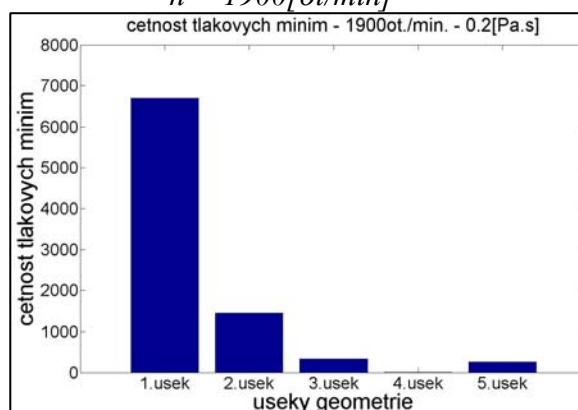


**Obr.4.23 - četnost minim tlaků v závislosti na poloze výskytu – různé otáčky pastorku**

**Obr.4.23c – četnost tlaků**  
 $n = 1700[\text{ot/min}]$

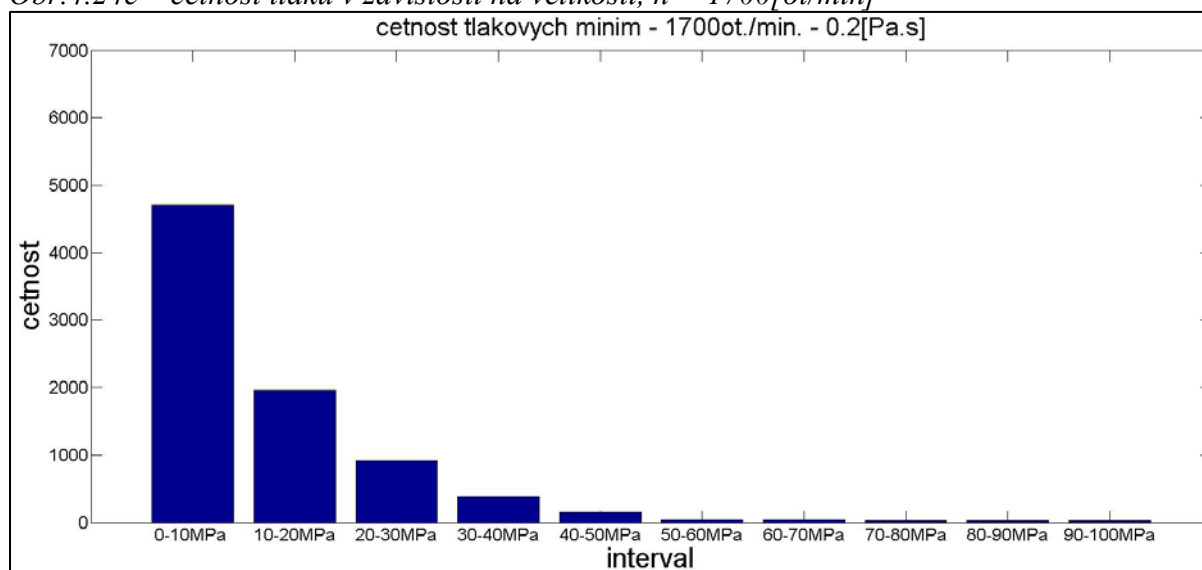


**Obr.4.23d – četnost tlaků**  
 $n = 1900[\text{ot/min}]$

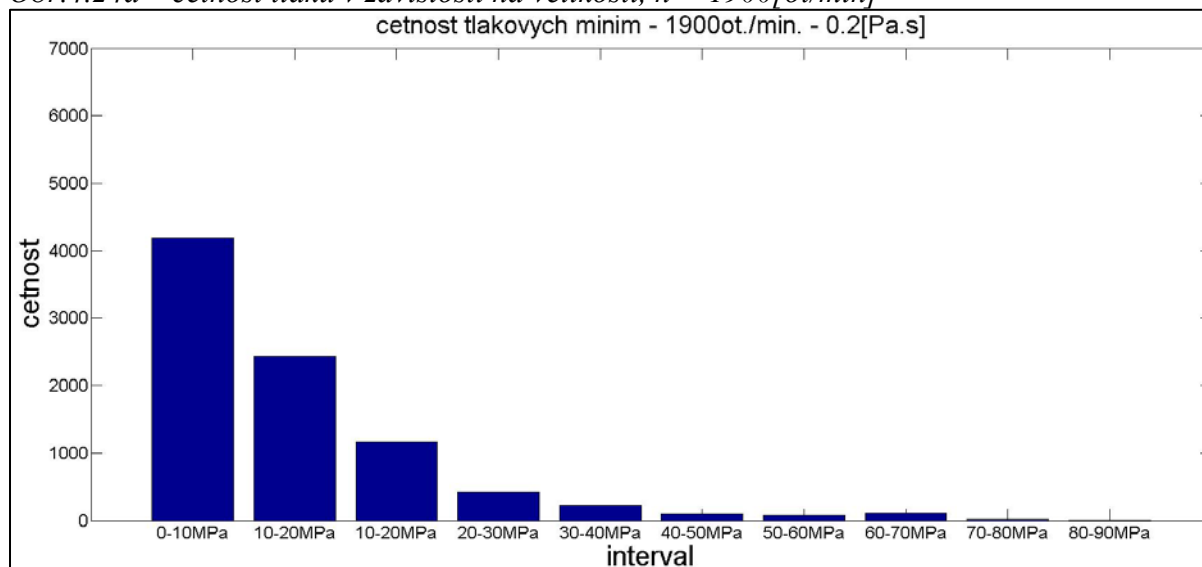


**Obr.4.24 - četnost minim tlaků v závislosti na velikosti podtlaků – různé otáčky pastorku**

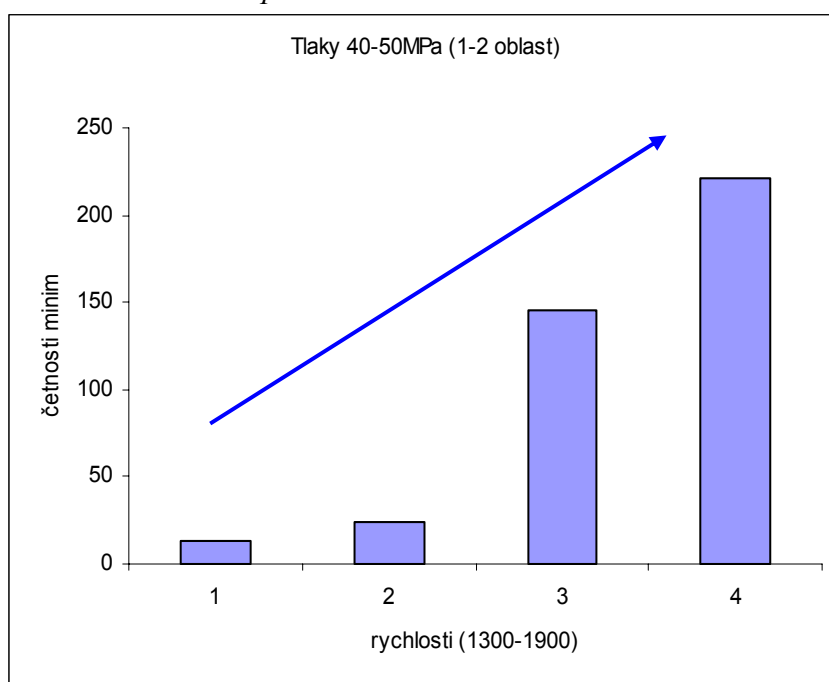
**Obr.4.24c – četnost tlaků v závislosti na velikosti,  $n = 1700[\text{ot/min}]$**



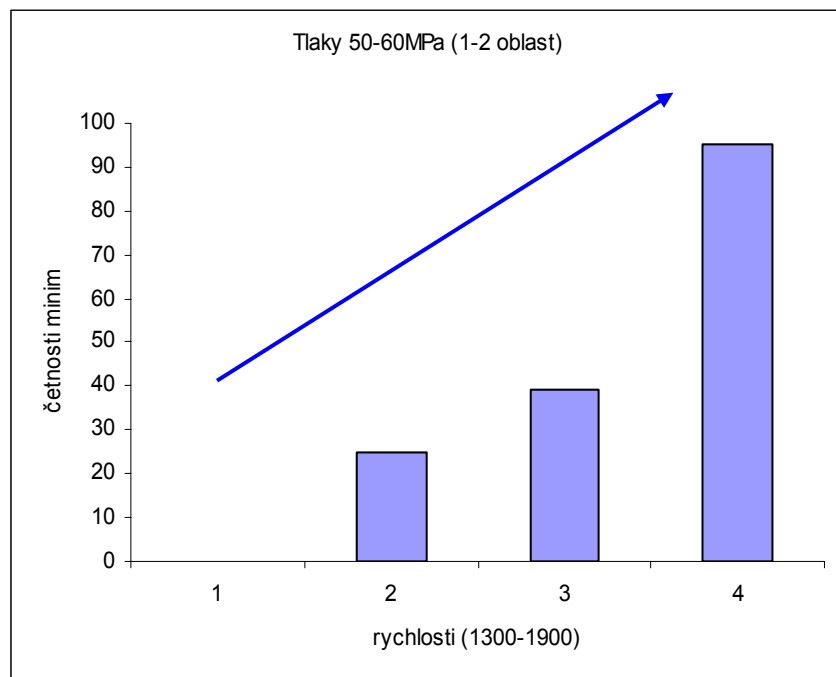
Obr.4.24d – četnost tlaků v závislosti na velikosti,  $n = 1900[\text{ot/min}]$



Obr.4.26c – četnosti podtlaků 40-50MPa



Obr.4.26d – četnosti podtlaků 50-60MPa



Tabulka č.11 - souhrnný přehled výskytu podtlaků pro všechny uvažované rychlosti

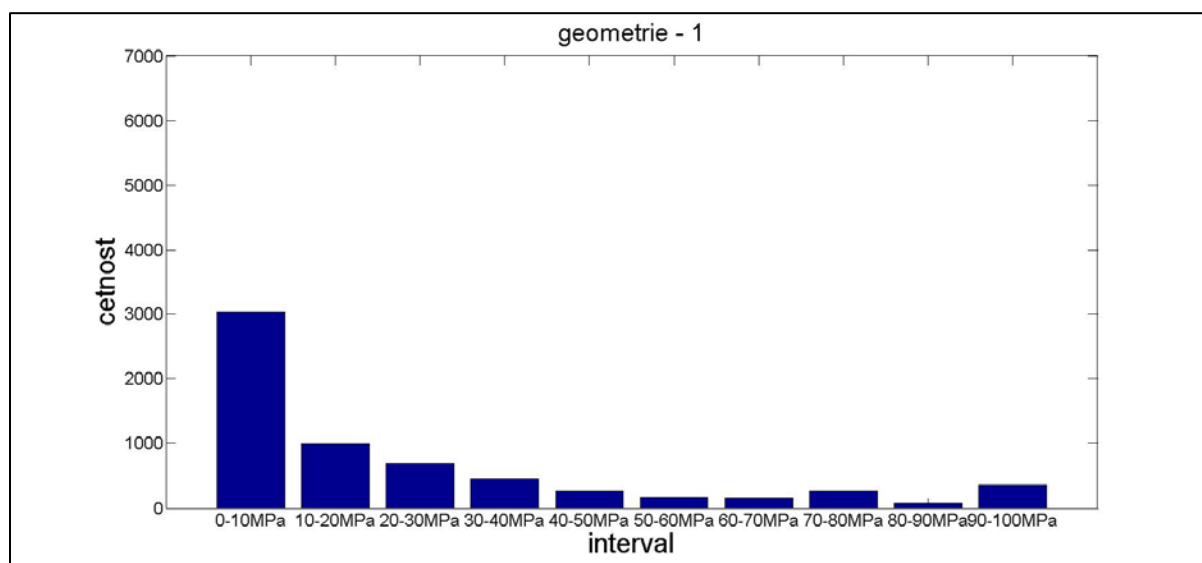
tlak Mpa							otáčky 1300/min			
úsek	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
1	4928	1618	270	91	5	0	0	0	0	0
2	384	538	86	49	8	0	0	0	0	0
3	182	28	0	0	0	0	0	0	0	0
4	63	21	0	0	0	0	1	0	0	0
5	375	42	0	0	0	0	0	0	0	0

tlak Mpa							otáčky 1500/min			
úsek	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
1	4422	2263	478	78	23	25	35	14	5	6
2	181	362	61	21	1	0	1	1	0	0
3	33	43	59	1	0	0	0	0	0	0
4	20	6	2	0	0	0	2	0	0	0
5	646	31	1	0	0	1	0	0	0	0

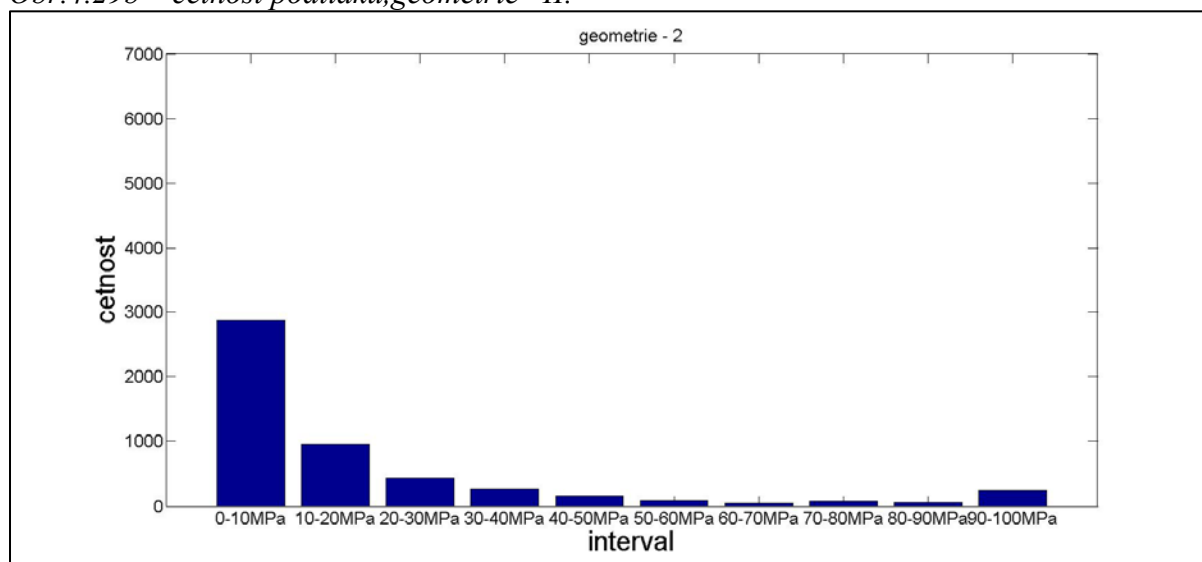
tlak Mpa							otáčky 1700/min			
úsek	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
1	4186	1503	590	129	26	3	0	0	1	1
2	268	308	296	250	119	36	30	27	20	20
3	40	90	12	3	1	0	0	0	1	0
4	138	48	14	1	0	1	1	0	1	0
5	77	4	0	0	0	0	0	0	0	0

tlak Mpa							otáčky 1900/min			
úsek	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100
1	3554	192	814	211	97	36	57	5	1	1
2	174	481	315	205	124	59	24	105	11	7
3	210	84	29	2	1	1	0	0	0	0
4	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
5	248	6	1	0	0	0	0	0	0	0

Obr.4.29a – četnost podtlaků, geometrie – I.

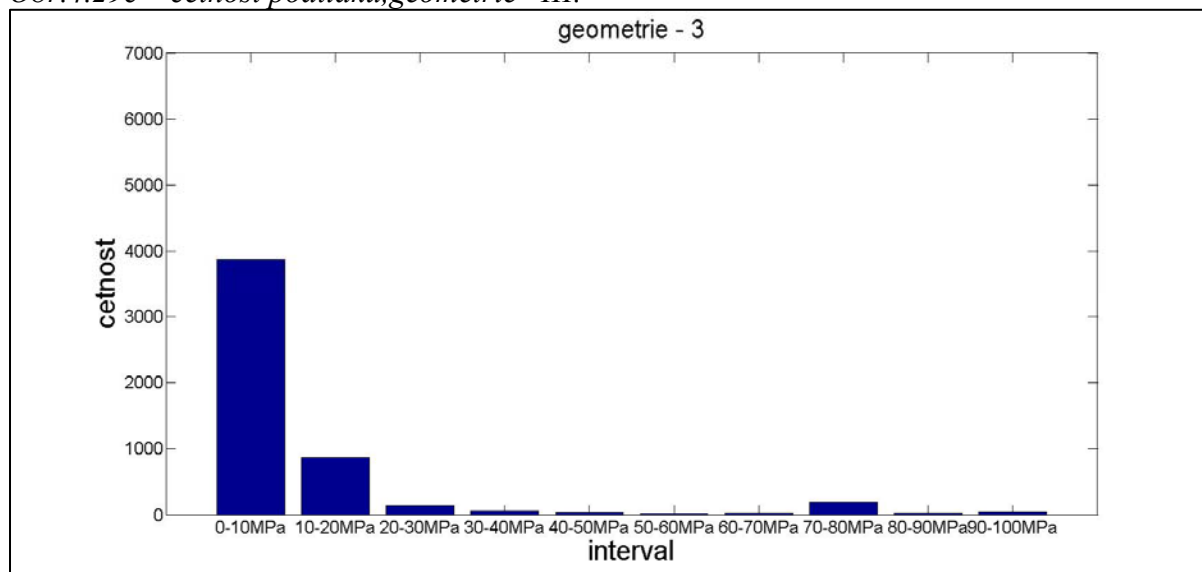


Obr.4.29b – četnost podtlaků, geometrie –II.





Obr.4.29c – četnost podtlaků, geometrie –III.



Tabulka č.15 - souhrnný přehled výskytu podtlaků pro tři uvažované typy geometrie

geometrie - I										
	0-10MPa	10-20MPa	20-30MPa	30-40	40-50MPa	50-60MPa	60-70MPa	70-80MPa	80-90MPa	90-100MPa
úsek 1.	32	16	5	3	0	2	2	2	1	1
úsek 2.	27	2	1	0	0	1	0	0	0	0
úsek 3.	46	22	1	3	0	1	1	1	0	0
úsek 4.	60	33	36	60	54	41	37	76	9	189
úsek 5.	2864	917	654	390	211	126	117	181	73	171
	3029	990	697	456	265	170	157	259	83	360
										62
										30
										74
										597
										5702

geometrie - II										
	0-10MPa	10-20MPa	20-30MPa	30-40	40-50MPa	50-60MPa	60-70MPa	70-80MPa	80-90MPa	90-100MPa
úsek 1.	1853	401	131	78	16	7	11	30	21	76
úsek 2.	794	416	224	153	102	64	25	18	9	91
úsek 3.	76	9	2	0	0	1	0	0	0	0
úsek 4.	3	8	0	0	0	0	0	0	0	0
úsek 5.	150	131	78	29	42	20	10	29	28	73
	2876	965	434	260	159	92	46	78	57	240
										2623
										1895
										88
										11
										590

geometrie - III										
	0-10MPa	10-20MPa	20-30MPa	30-40	40-50MPa	50-60MPa	60-70MPa	70-80MPa	80-90MPa	90-100MPa
úsek 1.	1474	81	2	0	0	0	0	0	0	0
úsek 2.	968	233	68	43	16	1	0	0	0	0
úsek 3.	636	219	7	2	0	0	0	0	0	0
úsek 4.	599	72	51	20	22	16	22	190	25	49
úsek 5.	191	260	18	0	2	1	0	1	0	0
	3869	863	146	64	40	18	22	191	25	49
										1556
										1328
										863
										1067
										472